

N° D'ORDRE :

1372.

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES,

PAR M. SALET,

Aide-Astronome à l'Observatoire de Paris.

1^{re} THÈSE. — SUR L'ÉTUDE DE LA POLARISATION EN ASTRONOMIE.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le 13 avril 1910, devant la Commission d'examen.



MM. G. LIPPMANN, *Président.*

G. URBAIN, }
PUISEUX, } *Examineurs.*

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS,

Quai des Grands-Augustins, 55.

1910

UNIVERSITÉ DE PARIS.

FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS.

MM.		
Doyen.....	P. APPELL, professeur.	Mécanique rationnelle.
Doyen honoraire.....	G. DARBOUX.....	Géométrie supérieure.
Professeurs honoraires...	L. TROOST.	
	CH. WOLF.	
	RIBAN.	
Professeurs.....	LIPPMANN.....	Physique.
	BOUTY.....	Physique.
	BOUSSINESQ.....	Physique mathématique et Calcul des probabilités.
	PICARD.....	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.
	H. POINCARÉ.....	Astronomie mathématique et Mécanique céleste.
	YVES DELAGE.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie compar.
	G. BONNIER.....	Botanique.
	DASTRE.....	Physiologie.
	KOENIGS.....	Mécanique physique et expérimentale.
	VELAIN.....	Géographie physique.
	GOURSAT.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	CHATIN.....	Histologie.
	HALLER.....	Chimie organique.
	JOANNIS.....	Chimie (Enseignement P. C. N.).
	P. JANET.....	Physique (Enseignement P. C. N.).
	WALLERANT.....	Minéralogie.
	ANDOYER.....	Astronomie physique.
	PAINLEVÉ.....	Mathématiques générales.
	HAUG.....	Géologie.
	TANNERY.....	Calcul différentiel et Calcul intégral.
	RAFFY.....	Application de l'Analyse à la Géométrie.
	HOUSSAY.....	Zoologie.
	H. LE CHATELIER...	Chimie.
	GABRIEL BERTRAND...	Chimie biologique.
	M ^{me} P. CURIE.....	Physique générale.
	CAULLERY.....	Zoologie (évolution des êtres organisés).
	C. CHABRIÉ.....	Chimie appliquée.
	G. URBAIN.....	Chimie.
	BOREL.....	Théorie des fonctions.
	MARCHIS.....	Aviation.
	N.....	Zoologie, Anatomie, Physiologie compar.
Professeurs adjoints.....	PUISEUX.....	Mécanique et Astronomie.
	LEDUC.....	Physique.
	MATRUCHOT.....	Botanique.
	MICHEL.....	Minéralogie.
	PRUVOT.....	Anatomie comparée.
	HEROUARD.....	Zoologie.
	LÉON BERTRAND.....	Géologie.
	RÉMY PERRIER.....	Zoologie (Enseignement P. C. N.).
	JEAN PERRIN.....	Chimie physique.
	MOLLIARD.....	Physiologie végétale.
Secrétaire.....	COTTON.....	Physique.
	A. GUILLET.	

PREMIÈRE THÈSE.

SUR

L'ÉTUDE DE LA POLARISATION EN ASTRONOMIE.

INTRODUCTION.

L'Astronomie physique a été véritablement transformée vers 1860, par l'application aux astres de l'analyse spectrale. Cette merveilleuse méthode a ouvert un champ immense aux recherches scientifiques et l'on peut dire que les données fournies par le spectroscope constituent actuellement la base de presque toute l'Astrophysique. Ces recherches sont d'ailleurs loin d'être achevées. Pour le Soleil, notamment, les découvertes faites au moyen du spectrohéliographe se succèdent tous les jours. Dans notre Ouvrage intitulé *Spectroscopie astronomique*, nous avons cherché à fixer l'état actuel de cette science et à donner un résumé des résultats acquis.

Mais l'analyse complète de la lumière qui nous vient des astres ne comprend pas seulement la Spectroscopie et la Photométrie. On peut aussi étudier la polarisation et encore ce qu'on pourrait appeler la *spectropolarisation*, c'est-à-dire la polarisation des rayons de différentes longueurs d'onde qui forment un faisceau complexe.

L'étude de la polarisation en Astronomie a été abordée bien avant celle de la Spectroscopie, et le grand nom d'Arago domine les recherches faites dans cette voie à partir de 1840. Les polariscopes n'ayant pas été perfectionnés depuis cette époque, et ne pouvant sans doute pas l'être, on pourrait croire que ce sujet est complètement épuisé. Pourtant il n'en est rien, et, pour s'en convaincre, il suffira d'examiner, sinon nos modestes recherches, du moins les travaux de Landerer, Newall et de tant d'autres observateurs modernes.

L'étude de la polarisation de la couronne solaire par une méthode photo-

graphique précise n'a été abordée par nous qu'en 1905. La spectropolarisation de la couronne n'a été étudiée qu'en 1900 et en 1905. Ces travaux ne constituent que le commencement d'une série de recherches plus importantes et plus précises; ils ont pourtant déjà donné quelques résultats nouveaux, et la théorie de Wood, par exemple, complètement différente de toutes celles que l'on connaissait jusqu'ici, est basée en partie sur les résultats polariscopiques.

La découverte par Hale de l'effet Zeeman dans les taches solaires constitue une magnifique application moderne de la spectropolarisation à l'Astronomie. Nous avons tiré de cette découverte une évaluation du champ magnétique solaire. Or, la considération de ce champ magnétique, dont l'existence était niée autrefois, prend de jour en jour plus d'importance en Astronomie. M. Chrétien ⁽¹⁾ s'en est servi pour expliquer les phénomènes cométaires. M. Bosler ⁽²⁾ a étudié l'effet de la charge électrique qui produit ce champ sur le champ magnétique terrestre.

Nous verrons une méthode, basée sur l'étude de la polarisation coronale, qui permet de mettre en évidence ce champ magnétique solaire.

Nous passerons en revue les autres applications de la polarisation aux comètes, nos observations sur la polarisation de Mercure, de Vénus, etc. Nous commencerons par parler des rapports de la polarisation atmosphérique à l'Astronomie; cette étude ne peut guère être séparée de celle des astres, et nous verrons de plus qu'elle nous a conduit à une méthode permettant d'augmenter la visibilité des étoiles observées le jour.

Nous séparerons chaque Chapitre en deux parties, la première donnant un bref aperçu historique, la seconde traitant de nos recherches personnelles.



CHAPITRE I.

LA POLARISATION ATMOSPHÉRIQUE.



Historique. — Les rapports entre la polarisation atmosphérique et les phénomènes astronomiques n'ont pas donné lieu à de nombreux travaux. Pourtant, dès 1842, *Arago* avait remarqué l'influence nuisible que la polarisation atmo-

⁽¹⁾ *Bulletin de la Société astronomique*, 1909, p. 280.

⁽²⁾ *Bulletin astronomique*, 1909, p. 271.

sphérique peut avoir sur les observations de polarisation des corps célestes. Nous parlerons de cette influence notamment à propos de la polarisation de la couronne solaire. Signalons seulement ici les recherches sur la polarisation atmosphérique qui sont en connexion avec les phénomènes astronomiques.

La polarisation de l'atmosphère par la lumière de la Lune a été aperçue par *Délezenne*, puis étudiée par *Cornu* ⁽¹⁾ et surtout par *Piltchikoff* ⁽²⁾.

Les variations de la polarisation atmosphérique pendant les éclipses totales du Soleil ont été étudiées notamment par *Turner* et *Newall* en 1900 ⁽³⁾ au moyen de polariscopes de Savart braqués vers différents points du ciel. *Piltchikoff* ⁽⁴⁾, pendant l'éclipse du 30 août 1905, a observé que la polarisation atmosphérique, à une distance de 90° du Soleil et dans un plan vertical passant par cet astre, devint subitement nulle au moment de la totalité.

Travaux personnels. — Nous avons indiqué ⁽⁵⁾ une méthode permettant d'augmenter la visibilité des étoiles en plein jour, et par suite d'améliorer considérablement les observations méridiennes concernant notamment la détermination des latitudes.

La lumière bleue du ciel, qui nous empêche de voir les étoiles en plein jour, est fortement polarisée; la proportion de lumière polarisée, d'après les expériences de *Cornu* ⁽⁶⁾, peut atteindre 0,80 quand l'air est très pur. La lumière des étoiles, au contraire, n'est pas polarisée. Si l'on éteint avec un nicol la lumière polarisée de l'atmosphère, il est évident que le rapport de l'éclat apparent de l'astre à l'éclat du fond du ciel sera augmenté; l'astre sera donc plus visible, ou pourra le devenir, s'il était au-dessous de la limite de visibilité.

Ce procédé serait surtout avantageux pour l'observation des polaires aux instruments méridiens. En effet, par suite du mouvement écliptique du Soleil de part et d'autre de l'équateur, ces étoiles se trouvent, en moyenne, à 90° du Soleil, c'est-à-dire dans les meilleures conditions d'observation, puisque la proportion de lumière polarisée est précisément maxima à 90° du Soleil. D'ailleurs l'un des passages au méridien a toujours lieu le jour, et l'observation des deux passages est de la plus grande importance en Astronomie. Nous verrons que l'emploi du nicol permet parfois d'obtenir d'un instrument donné les mêmes

(1) *Congrès de Limoges*, 1890, p. 270.

(2) *Comptes rendus*, t. CXIV, 1892, p. 468.

(3) *Proceedings of the royal Society*, t. LXVII, 1900, p. 365.

(4) *Comptes rendus*, t. CXLI, 1905, p. 472; t. CXLII, 1906, p. 1449.

(5) *Bulletin astronomique*, 1909, p. 225.

(6) *Congrès de Limoges*, 1890, p. 267.

services que d'un instrument d'ouverture double. On voit donc que cette méthode permet d'augmenter beaucoup la valeur des méthodes concernant la détermination des latitudes.

Dans le même ordre d'idées, *Arago* ⁽¹⁾ avait proposé de se servir d'une tourmaline pour distinguer les écueils en mer calme malgré l'éclat de la lumière réfléchie qui les masque; *Brewster* et *Hagenbach* ⁽²⁾ avaient imaginé un procédé semblable pour se débarrasser de la brume bleuâtre qui voile les objets terrestres à l'horizon. *Mackenzie* ⁽³⁾ avait indiqué l'utilité de se servir d'un nicol pour les observations du Soleil faites avec le sextant. Dans ce cas, si le Soleil est assez éloigné de l'horizon, on peut, en effet, avoir une meilleure définition de la ligne d'horizon par la suppression de la lumière polarisée de l'atmosphère placée devant elle. Quant à l'emploi du nicol dans les observations astronomiques de jour, il n'avait pas été proposé, à notre connaissance, ni mis en pratique. Nous avons donc cru utile de l'étudier théoriquement et pratiquement.

Théorie de l'oculaire polarisant. — Examinons d'abord le cas d'un objet de diamètre apparent sensible. Soient e son éclat par unité de surface, E l'éclat du ciel; nous poserons

$$E = E' + E'' = pE + E'',$$

E' représentant l'éclat par unité de surface de la lumière polarisée du ciel, E'' celui de la lumière neutre, p la proportion de lumière polarisée. Dans une observation de jour, le rapport de l'éclat apparent de l'objet à l'éclat du fond du ciel vaudra

$$R_1 = \frac{E + e}{E}.$$

Supprimons avec un nicol la lumière polarisée E' du ciel; e et E'' seront diminués de moitié et le rapport précédent deviendra

$$R_2 = \frac{E + e - E'}{E - E'} = \frac{E + \frac{e}{1-p}}{E}.$$

La deuxième expression de ce rapport nous montre qu'avec un nicol le rapport de l'éclat apparent de l'objet à l'éclat du fond du ciel a la même valeur

⁽¹⁾ *Œuvres*, t. IX, p. 76.

⁽²⁾ *Comptes rendus*, t. XLVIII, 1859, p. 384. — *DAGUIN, Traité de Physique*, t. IV, p. 572.

⁽³⁾ *Monthly Notices*, t. XLVI, 1885, p. 29.

que si l'éclat intrinsèque e de l'objet avait été multiplié par le facteur $\frac{1}{1-p}$. On pourra donc, en se servant d'un nicol, apercevoir des objets dont l'éclat sera $e_1(1-p)$, e_1 désignant l'éclat de ceux qui se trouvaient, dans les conditions considérées, à la limite de visibilité.

Dans le cas des étoiles, l'éclat venant de l'atmosphère qui se superpose à l'éclat de l'étoile est extrêmement faible. En effet, l'éclat par unité de surface d'un disque stellaire est du même ordre de grandeur que celui du Soleil, et ce dernier, d'après les mesures de Bouguer et d'Arago, est au moins mille fois plus grand que l'éclat du ciel par unité de surface. On pourrait donc croire qu'on peut négliger l'éclat du ciel devant celui de l'étoile et poser

$$R_1 = \frac{e}{E}.$$

Mais, en réalité, ce qu'il faut considérer n'est pas le diamètre stellaire réel, mais la tache que l'étoile produit sur la rétine en raison de la diffraction. L'éclat de cette tache se superpose, en effet, sur la rétine à l'éclat du fond du ciel. Nous désignerons donc par e l'éclat d'un point de la tache sur la rétine, par E l'éclat produit par le ciel sur la rétine; le rapport de l'éclat apparent de ce point de la tache à l'éclat du fond du ciel sera donné par la même formule que précédemment :

$$R_1 = \frac{E + e}{E},$$

$$R_2 = \frac{E + e - E'}{E - E'} = \frac{E + \frac{e}{1-p}}{E}.$$

La seconde expression du rapport R_2 nous montre encore qu'avec un nicol le rapport d'intensité a la même valeur que si e avait été multiplié par $\frac{1}{1-p}$.

D'ailleurs e est proportionnel à l'éclat total ε de l'étoile. On pourra donc apercevoir, avec le nicol, des étoiles d'éclat $\varepsilon_1(1-p)$, ε_1 désignant l'éclat limite de visibilité dans les conditions considérées. En résumé, dans le cas des étoiles comme dans le cas précédent, tout se passe comme si l'éclat absolu de l'astre avait été multiplié par $\frac{1}{1-p}$.

Nous pouvons aussi chercher de combien l'éclat *apparent* de l'astre, comparé à celui du ciel, a été augmenté. Si l'on désigne par D , la différence de sensation ou, si l'on veut, la différence de grandeur stellaire d'une petite surface de l'objet

et d'une surface égale du ciel, on a, d'après la loi de Fechner,

$$\alpha D_1 = \log \frac{E + e}{E} = \log R_1;$$

α est une constante qui dépend évidemment de la sensibilité de l'œil puisque, pour une même valeur de R_1 , la différence de sensation pourra ou non être sensible, suivant l'observateur.

Si l'on désigne par D_2 la différence de grandeur stellaire quand on emploie le nicol, on a

$$\alpha D_2 = \log R_2, \quad D_2 - D_1 = \frac{1}{\alpha} \log \frac{R_2}{R_1}.$$

Dans le cas des objets de diamètre apparent sensible qui sont à la limite de visibilité, e est petit par rapport à E . Les différences d'intensité qu'on peut observer dans les mesures photométriques donnent, en effet,

$$e = \frac{1}{60} E.$$

Mais alors R_1 est voisin de l'unité et la première expression du rapport R_2 montre que le rapport de l'éclat apparent de l'objet à l'éclat du ciel est peu augmenté par l'emploi du nicol. Au contraire, nous verrons tout à l'heure que, dans le cas des étoiles à la limite de visibilité, e n'est pas aussi petit par rapport à E ; on en conclut donc que le rapport de l'éclat de l'étoile à l'éclat du ciel est bien plus augmenté que dans le cas des objets à diamètre apparent sensible ⁽¹⁾; on pourrait donc croire que l'emploi du nicol est plus avantageux pour les étoiles. Ce paradoxe demande une étude un peu détaillée. Tout d'abord l'éclat e d'une étoile à la limite de visibilité vaut-il $\frac{1}{60} E$, comme on l'a déduit des mesures photométriques?

Il est évident que ce résultat ne s'applique qu'à de larges surfaces dont on peut apprécier la différence d'intensité sur un long périmètre.

Si l'objet est petit, il semble bien, *a priori*, qu'il lui faudra un éclat bien supérieur pour être vu, et surtout pour être aperçu.

Nous sommes donc amenés à résoudre incidemment la question suivante : Comment varie la sensibilité de l'œil quand le diamètre de la tache produite sur la rétine diminue ?

(1) Le rapport $\frac{R_2}{R_1}$ vaut $\frac{E + \frac{e}{1-p}}{E + e}$ et augmente par conséquent de 1 à $\frac{1}{1-p}$ quand e croît de 0 à ∞ .

Arago estimait que la tache produite par une étoile sur la rétine devait avoir un diamètre angulaire de 1' environ et il pensait aussi que la sensibilité de l'œil était la même pour les taches stellaires que pour les mesures photométriques; mais ces deux affirmations étaient purement hypothétiques.

Pour nous convaincre que la sensibilité est plus faible pour les étoiles que pour les astres de diamètre apparent sensible, considérons, par exemple, la tache lumineuse produite par Sirius sur la rétine. Arago, comme nous l'avons dit, estimait qu'une tache stellaire devait avoir un diamètre de 1'. En réalité, si nous calculons ce diamètre en nous servant des formules qui conviennent aux objectifs, nous trouverons que, d'après la largeur de la pupille, le diamètre de la tache doit être de 45" à 50". Or, la quantité que Pickering appelle *diamètre équivalent en lumière* vaut 0",03 pour Sirius. Il est facile d'en conclure l'éclat moyen par unité de surface de la tache produite par Sirius comparé à l'éclat de l'image du Soleil sur la rétine. D'autre part, on peut aussi calculer le rapport de l'éclat moyen de la tache à l'éclat par unité de surface du centre de la tache (cet éclat est plus grand que le premier, comme il est facile de le comprendre d'après la forme du *solide de diffraction*). On trouve ainsi que l'éclat du centre de la tache vaut 10^{-6} de l'éclat que le Soleil aurait produit sur la rétine. Si nous admettons que l'éclat par unité de surface du Soleil vaut 8×10^5 de l'éclat de la Lune, on voit que l'éclat du centre de la tache de Sirius serait sensiblement égal à l'éclat que la Lune produit sur la rétine. Or, la Lune est facilement visible en plein jour; il est loin d'en être de même pour la plus brillante des étoiles; on doit donc en conclure que la valeur de la sensibilité de l'œil déduite des mesures photométriques ne s'applique pas aux objets très petits, contrairement à l'opinion d'Arago.

On peut même calculer cette différence de sensibilité en considérant l'éclat de la tache produite sur la rétine par les étoiles qui sont, la nuit, à la limite de visibilité. On trouve, en partant de la valeur du *diamètre équivalent* des étoiles de grandeur 6,5, que l'éclat du centre de la tache vaut 5×10^{-4} de l'éclat qu'aurait produit la Lune. Or, on admet généralement que, pour une source de diamètre apparent sensible, l'éclat minimum qu'on puisse apercevoir vaut seulement 10^{-5} de l'éclat de la Lune. L'œil serait donc environ 50 fois moins sensible quand la source a un diamètre très petit.

Ce calcul suppose, bien entendu, que le diamètre de la tache sur la rétine a bien la valeur qu'on peut prévoir d'après la théorie des objectifs; mais il est peu probable que la surface de cette tache soit 50 fois plus grande que ne le veut la théorie.

On pourrait objecter que les diamètres que nous avons trouvés pour les

taches stellaires sont en contradiction avec le peu de pouvoir séparateur de l'œil qui ne sépare certainement pas des étoiles écartées de $1'$.

On pourrait d'abord attribuer ce défaut de sensibilité de l'œil à la largeur des bâtonnets et des cônes de la rétine; il est évident, en effet, que le diamètre de la tache produite sur la rétine doit être augmenté, en moyenne, de la largeur d'un bâtonnet. Mais, d'après Helmholtz ⁽¹⁾, le diamètre des cônes et des bâtonnets est de l'ordre de $0^{\text{mm}},002$, la distance focale de l'œil vaut $14^{\text{mm}},7$; on en conclut que le diamètre angulaire de la tache ne serait augmenté, de ce fait, que de $30''$ environ, c'est-à-dire que sa surface serait seulement doublée.

Il peut se faire, bien plutôt, que l'irradiation joue un rôle, comme le pensait Plateau, si tous les bâtonnets ne sont pas absolument indépendants. Enfin, le peu de pouvoir séparateur de l'œil peut être dû à des causes physiologiques variées, et l'on peut l'expliquer sans supposer que la tache géométrique donnée par les surfaces réfringentes de l'œil est 50 fois plus grande que ne le veut la théorie des lentilles.

Il peut donc se faire, comme nous voulions le démontrer, et même il est très probable que, dans le cas des étoiles, e ne soit pas petit par rapport à E quand l'étoile est à la limite de visibilité. Alors R_1 n'est pas voisin de l'unité et, par suite, ce rapport est augmenté par l'emploi du nicol dans des proportions beaucoup plus considérables que pour les astres à diamètre apparent sensible. On pourrait donc penser que l'emploi du nicol présente de plus grands avantages dans le cas des étoiles. Mais il est facile de se rendre compte que cette augmentation du facteur $\log \frac{R_2}{R_1}$ est compensée par la valeur du facteur α , car nous avons vu que la sensibilité de l'œil est moindre dans le cas des étoiles. L'emploi du nicol n'est donc pas plus avantageux pour les étoiles, comme on aurait pu le croire.

Nous avons vu que si l'on désigne par ε_1 l'éclat absolu des étoiles qui sont, dans des conditions données, à la limite de visibilité, et par ε_2 l'éclat des étoiles qu'on peut voir avec le nicol, on a

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1(1 - p).$$

On peut donc apercevoir des étoiles d'éclat 5 fois plus faible quand la proportion de lumière polarisée vaut 0,80.

⁽¹⁾ *Optique physiologique.*

Soient m_1, m_2 les grandeurs stellaires correspondantes; on a, d'après la formule de Pogson,

$$m_2 - m_1 = 2,5(\log \varepsilon_1 - \log \varepsilon_2) = -2,5 \log(1 - p).$$

On trouve ainsi que, dans les conditions les plus favorables, l'emploi du nicol permet d'abaisser la grandeur limite de visibilité de 1,75, c'est-à-dire de près de deux grandeurs.

Calculons l'ouverture O' d'un instrument qui donnerait sans nicol la même grandeur limite qu'un autre objectif d'ouverture O muni d'un nicol, on trouve

$$\log \frac{O'}{O} = \frac{m_2 - m_1}{5}; \quad \frac{O'}{O} = 2,2.$$

Un instrument armé d'un nicol est donc supérieur, quand les conditions sont favorables, à un instrument d'ouverture double.

Si l'étoile n'est pas à 90° du Soleil, on pourra calculer de combien le nicol abaisse la grandeur limite de visibilité si l'on connaît la loi de variation de la proportion de lumière polarisée suivant les régions du ciel. Il est facile de se faire une idée de cette loi en négligeant les réflexions secondaires, c'est-à-dire en ne considérant que les rayons diffractés directement par les particules de l'atmosphère.

La direction d'incidence des rayons solaires sur les particules situées sur un même rayon visuel est sensiblement constante; la proportion de lumière polarisée donnée par toutes ces particules sera donc la même que celle donnée par une seule particule. La lumière diffractée par une particule peut être séparée en deux parties : l'une, dont les vibrations sont perpendiculaires au plan du Soleil, et dont l'intensité vaudra a^2 ; l'autre, dont les vibrations sont perpendiculaires aux premières et dont l'intensité sera $a^2 \cos^2 \delta$, δ étant la distance angulaire du rayon visuel au Soleil. La proportion de lumière polarisée sera

$$p = \frac{a^2 - a^2 \cos^2 \delta}{a^2 + a^2 \cos^2 \delta} = \frac{\sin^2 \delta}{1 + \cos^2 \delta}.$$

Cette proportion de lumière polarisée théorique vaudrait 1 à 90° du Soleil. En réalité, la polarisation ne dépasse pas 0,6 en moyenne; on peut donc admettre qu'on a à peu près

$$p = 0,6 \frac{\sin^2 \delta}{1 + \cos^2 \delta}.$$

Dans le cas de la polarisation atmosphérique, cette formule représente les observations aussi bien que la formule que Hurion ⁽¹⁾ a tirée de la théorie de Soret ⁽²⁾, et qui tient compte de la diffusion secondaire produite par les régions voisines de la particule considérée. Pour nous en convaincre nous donnons, pour différentes distances δ au Soleil, les valeurs p et p' de la proportion de lumière polarisée calculées par notre formule et par celle de Soret et les valeurs observées par Hurion. La cinquième colonne donne, en grandeur stellaire, la valeur de l'augmentation de visibilité produite par le nicol :

δ .	p .	p' .	Observ.	$m_2 - m_1$.
⁰				^{gr}
90	0,59	0,59	0,59	1,0
80	0,55	0,55	0,56	0,9
70	0,46	0,47	0,48	0,7
60	0,35	0,36	0,35	0,5
50	0,24	0,24	0,24	0,3
40	0,15	0,13	0,13	0,2

Il est évident que l'emploi du nicol permettrait aussi de voir plus facilement les étoiles à l'œil nu au coucher du Soleil, et cela d'autant mieux que la proportion de lumière polarisée du ciel augmente au moment du coucher du Soleil, d'après les observations de Cornu ⁽³⁾. On sait par les travaux de Schmidt ⁽⁴⁾ que les étoiles de première grandeur apparaissent à peu près, pour un œil exercé, au coucher du Soleil et les étoiles de deuxième ou de troisième grandeur environ 30 minutes après ; ces moments varient naturellement avec la saison. Avec un nicol, les étoiles de grandeur 2,5 pourraient être vues au moment du coucher du Soleil et les étoiles de première grandeur sensiblement avant, c'est-à-dire le jour. Il est bien entendu qu'il faudrait observer des étoiles situées à peu près à 90° du Soleil, choisir un instant où la polarisation soit assez grande, et enfin déterminer au moyen de tubes sans lentilles la direction où l'on doit chercher l'étoile. Nous ne nous étendrons pas sur ce sujet qui n'a pas d'utilité pratique.

Vérifications expérimentales. — Ces déductions théoriques demandaient des confirmations pratiques. Nous avons admis notamment que lorsqu'une étoile

(1) *Comptes rendus*, t. CXIV, 1892, p. 910; t. CXVI, 1893, p. 795.

(2) *Ann. de Chim. et de Phys.*, 6^e série, t. XIV, p. 503.

(3) *Congrès de Limoges*, 1890, p. 267.

(4) Ch. ANDRÉ, *Traité d'Astronomie*, p. 79.

est à la limite de visibilité, c'est-à-dire lorsque la différence de sensation correspondant à l'étoile et au fond du ciel a une valeur minima donnée, le rapport de l'éclat de l'étoile à l'éclat du ciel a une valeur indépendante de cet éclat. Nous avons donc admis, en somme, la loi de Fechner et, bien que cette loi serve de base à la formule qui relie les éclats et les grandeurs stellaires, il ne faut pas oublier que ce n'est pas une loi mathématique.

Au point de vue pratique j'ai donc appliqué l'emploi du nicol à l'observation des polaires. L'instrument était le grand Instrument méridien de l'Observatoire de Paris, dont l'ouverture est de 23^{cm}. Devant l'oculaire était placé un nicol à faces perpendiculaires. Il faut remarquer à ce sujet que la longueur du nicol doit être évidemment aussi courte que possible ; la largeur étant proportionnelle à la longueur, il faut calculer le diamètre de l'anneau oculaire et prendre un nicol assez large pour ne pas intercepter une partie du faisceau (1).

Nos expériences ont confirmé les prévisions théoriques. Lorsqu'on observe une étoile à la limite de visibilité, elle apparaît ou disparaît quand on tourne le nicol autour de son axe. La lumière neutre est diminuée de moitié, il en résulte un affaiblissement général qui est loin d'être un désavantage dans les observations de jour. Lorsqu'on éteint avec le nicol la lumière polarisée du ciel, l'étoile est plus visible et semble aussi plus stable, c'est-à-dire qu'elle présente un point lumineux et non pas une suite de petits éclats lumineux, comme le font les étoiles qui sont, le jour, à la limite de visibilité.

J'ai pu observer ainsi la Polaire (grandeur = 2,2), alors qu'on la soupçonnait à peine sans nicol. Puis j'ai étudié 51 Céphée (Hévélius), dont la grandeur n'est que 5,3, et j'ai pu l'observer le 28 novembre à 2^h, 30^m, c'est-à-dire en plein jour.

Il faut remarquer que la saison était favorable pour l'observation des étoiles faibles, parce que le Soleil était peu élevé au-dessus de l'horizon ; mais, d'autre part, la proportion de lumière polarisée était faible. L'hiver, il y a toujours plus ou moins de brume, et l'on sait, par les observations de Cornu (2), que les vents du Nord et de l'Est, qui coïncident généralement avec les temps découverts, amènent toujours une diminution notable de la proportion de lumière polarisée. Quoi qu'il en soit, ces observations montrent que, dans les conditions choisies, on peut observer le jour non seulement la Polaire (gr. = 2,2)

(1) Depuis, M. Gautier a construit pour le même instrument un oculaire polarisant comportant une tourmaline qui donne aussi de bons résultats en ayant soin de prendre une tourmaline aussi claire que possible.

(2) *Congrès de Limoges*, 1890.

comme on le faisait jusqu'à présent, mais aussi 51 Céphée (Hévélius) dont la grandeur est 5,3 et, par suite, les étoiles polaires suivantes :

δ Petite Ourse.....	^{gr} 4,4	ζ Petite Ourse.....	^{gr} 4,6
3495 B.A.C.....	5,0	51 H. Céphée.....	5,3
43 H. Céphée.....	4,5	30 H. Girafe.....	5,3
ε Petite Ourse.....	4,5		

Le nombre des étoiles qu'on peut observer est donc augmenté dans une très grande proportion.

On peut aussi augmenter la visibilité des étoiles en plein jour en se servant d'un verre rouge. En effet, la lumière du ciel est surtout riche en rayons de petite longueur d'onde. Si l'on se sert des résultats de la théorie de Rayleigh dans le cas où le rayon des corpuscules diffusants est très petit, c'est-à-dire si l'on admet que la proportion de lumière diffusée par une particule vaut

$$J = \frac{A}{\lambda^4},$$

A étant une constante, il est facile de calculer l'augmentation de visibilité produite par un verre rouge. Si l'on désigne par R et B les éclats d'une étoile ayant le même spectre que le Soleil, avec et sans verre rouge, par r et b l'éclat du ciel avec et sans verre rouge, on trouve qu'on a à peu près

$$\frac{b}{r} = {}^2 \frac{B}{R}, \quad \frac{R}{r} = {}^2 \frac{B}{b}.$$

Le rapport de l'intensité de l'étoile à l'éclat du fond du ciel est à peu près doublé.

Le rapport $\frac{B}{R}$ dépend du type de l'étoile et est plus grand pour les étoiles de la classe I, plus petit pour ceux de la classe III. On peut pour ces autres types d'étoiles déterminer la valeur de l'augmentation de visibilité au moyen du photomètre hétérochrome de M. Nordmann. Il suffit d'amener à l'extinction l'étoile de comparaison avec et sans verre rouge, puis de comparer les éclats avec et sans verre rouge de l'étoile étudiée et de l'étoile de comparaison. Nous n'entrerons pas dans le détail du calcul et nous retiendrons seulement qu'en ajoutant un verre rouge au nicol comme l'a fait M. Fayet (¹), on peut, dans des conditions

(¹) *Revue scientifique*, 1909, p. 723.

moyennes, quadrupler au moins l'éclat d'une étoile, c'est-à-dire gagner au moins 1^{re}, 6.

L'emploi du nicol et du verre rouge permet de donner aux explorateurs polaires un moyen de faire le point plus précis que les procédés dont ils disposaient jusqu'ici. On explore les environs du pôle pendant l'été, c'est-à-dire que le Soleil est toujours au-dessus de l'horizon. Pour faire le point avec précision, il faudrait observer la hauteur de la polaire. Mais si l'on cherche le diamètre de la lunette qu'il faudrait emporter pour voir la Polaire quand le Soleil est à 20° au-dessus de l'horizon, on trouve qu'il faudrait des instruments de 10^{cm} à 12^{cm} d'ouverture, ce qui est impraticable. Or l'emploi du nicol et du verre rouge permet de réduire au moins de moitié l'ouverture de l'objectif (1). Il suffirait donc d'emporter une lunette de 5^{cm} à 6^{cm} d'ouverture, c'est-à-dire environ 8 fois moins lourde. Ce petit perfectionnement suffit donc pour rendre possible les observations d'étoiles dans les régions arctiques.

Nous pouvons ajouter que la partie la plus lourde et la plus encombrante d'un cercle méridien portatif est formée par sa monture et ses cercles. Pour une expédition polaire, on supprimerait les cercles et l'on munirait simplement la lunette d'une suspension à la cardan comme celle des baromètres portatifs. Si l'observateur est à moins de 2°, 5 du pôle, il pourra voir la Polaire et déterminer la latitude en mesurant simplement avec un micromètre sa distance au centre du champ.

Observation des aurores polaires. — On aperçoit souvent dans le spectroscopie la raie 557 du krypton, bien qu'aucune aurore ne soit visible parce que la lumière monochromatique de cette raie se détache sur le spectre affaibli du fond du ciel. D'autre part, il est bien certain que le maximum de fréquence et de visibilité des aurores aurait lieu le jour si la lumière de l'atmosphère n'empêchait de les voir. La lumière de l'aurore polaire n'est pas polarisée ; on peut donc avec un nicol augmenter la visibilité de la raie 557 et l'apercevoir plus tôt au crépuscule. Cette étude pourra présenter de l'intérêt pour déterminer l'heure du maximum diurne de fréquence des aurores et pour les rapports de l'aurore polaire avec les différentes variations météorologiques.

(1) Soient m la grandeur limite de visibilité d'un instrument d'ouverture O' sans nicol et O l'ouverture permettant de voir la polaire avec nicol, on trouve

$$\log O = \log O' + 0,14 - \frac{m}{5}.$$

Si $O' = 19$, $m = 3,5$, on trouve $O = 5,5$.

Observation sur la polarisation atmosphérique pendant l'éclipse du 30 août 1905. — Les changements qui peuvent se produire dans la polarisation atmosphérique pendant une éclipse totale sont de nature à nous renseigner sur la nature de ce phénomène. On admet généralement que la polarisation atmosphérique est identique au phénomène de polarisation par diffusion intérieure dans un milieu trouble; mais la lumière qui vient d'un point du ciel se compose de la lumière du Soleil venant directement se diffuser en ce point, et de la lumière provenant du reste de l'atmosphère éclairé par le Soleil. Ces deux lumières sont polarisées dans des plans différents. Les points neutres seraient les régions où ces deux polarisations ont la même intensité et des plans de polarisation rectangulaires.

Pendant une éclipse totale, une portion du ciel ne reçoit plus aucun rayon venant directement du Soleil, mais seulement ceux provenant des régions du ciel pour lesquelles le Soleil n'est pas complètement éclipsé. On doit donc s'attendre à voir le plan de polarisation tourner dans ces régions et se rapprocher de la normale à sa direction primitive. Aux points neutres, on peut s'attendre à voir la polarisation réapparaître, etc.

Pour étudier la polarisation atmosphérique pendant l'éclipse du 30 août 1905, nous avons employé deux polariscopes de Savart à cercle divisé, montés sur de petits tubes sans lentille, fixés sur le corps même d'une lunette équatoriale qui suivait le mouvement du Soleil. Ces petits tubes, munis de deux mouvements rectangulaires, étaient donc toujours braqués à la même distance du Soleil.

Ce procédé d'étude de la polarisation atmosphérique permet d'étudier les variations de l'angle du plan de polarisation et du plan du Soleil (¹); il est infiniment plus pratique que le procédé employé par Becquerel, qui était obligé de se servir d'un simple théodolite et, par suite, de faire une réduction compliquée à chaque observation, pour avoir l'angle du plan de polarisation et du plan du Soleil. Il y aurait, croyons-nous, avantage à reprendre les expériences de Becquerel sur la variation de position du plan de polarisation atmosphérique, en employant ainsi des polariscopes entraînés équatorialement par un mouvement d'horlogerie.

La lunette sur laquelle étaient montés les polariscopes était employée, comme nous le verrons plus loin, à faire des photographies de bandes de Savart sur la couronne solaire. Dans les intervalles de temps compris entre les différentes poses, M. le lieutenant Roquebert, qui avait bien voulu se charger de cette

(¹) On sait que cet angle n'est pas rigoureusement toujours nul (BECQUEREL, *Ann. de Chim. et de Phys.*, 1880, p. 90).

observation, devait tourner les Savart de manière à éteindre les bandes ; il répétait cette opération de 5 en 5 minutes depuis le commencement de l'éclipse partielle en notant la variation du plan de polarisation. Malheureusement il s'est trouvé, contre toute probabilité, que la proportion de lumière polarisée était sensiblement nulle aux points du ciel considérés. M. Roquebert m'annonça que, bien que le ciel fût largement assez lumineux, il ne voyait sûrement les bandes de polarisation dans aucune position du polariscope. Les photographies de bandes sur la couronne présentant beaucoup plus d'importance, nous avons préféré abandonner aussitôt cette partie du programme pour éviter le temps perdu par des recherches infructueuses. Le ciel était très lumineux, car les Arabes que j'avais chargés de cette mission n'ont pu compter que quatre planètes ou étoiles, y compris Vénus que j'avais aperçu déjà 10 minutes avant le second contact. L'obscurité était certainement moins grande que pour l'éclipse de 1900, que j'avais observée en Espagne et qui pourtant avait une durée beaucoup plus courte, surtout à l'endroit où j'observais. Je m'étais placé en effet, en 1900, aussi près que possible du bord de la zone de totalité et la durée de l'éclipse totale n'avait été que de 25 secondes.

Étant donné l'éclat du ciel, cette absence de polarisation à 90° du Soleil, qui confirme les observations faites par M. Piltschikoff à Philippeville, est un fait assez singulier (1). Rappelons que le polariscope de Savart est plus sensible que le photopolarimètre de Cornu que M. Piltschikoff emploie pour ses recherches de polarisation et de spectropolarisation atmosphérique. Cela tient à ce que les bandes noires et blanches ne sont séparées par aucune discontinuité, tandis que dans l'appareil de Cornu elles sont toujours séparées par une ligne brillante ou sombre qui empêche d'en évaluer aussi facilement la différence d'intensité.

A 30° ou 40° du Soleil, le ciel, examiné rapidement par un autre assistant avec un polariscope de Savart tenu à la main, montrait des bandes de polarisation sensibles. Ces bandes n'étaient pas visibles dans la lunette, comme nous le verrons plus loin, quand les bandes étaient inclinées à 45° . Il en résulte que la lumière du ciel était polarisée dans le voisinage du Soleil et que le plan de polarisation était *vertical ou horizontal*. Les résultats des éclipses précédentes ayant montré que la polarisation atmosphérique est généralement verticale dans le voisinage du Soleil éclipsé (2), nous en avons conclu que ce devait être aussi le cas. Pourtant, M. Newall qui observait non loin de moi, à Guelma, et qui disposait d'un polariscope permettant de trouver sans ambiguïté la position

(1) Voir PILTSCHIKOFF, *Comptes rendus*, t. CXLI, 1906, p. 1449.

(2) Voir BIGOURDAN, *Les éclipses de Soleil*, p. 135.

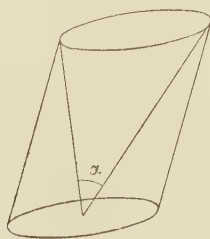
du plan de polarisation, a observé un plan de polarisation horizontal. Le polariscope de Savart ne permettant pas de lever l'ambiguïté qui reste entre la position verticale ou horizontale du plan de polarisation, nous ne pouvons confirmer ni contredire cette observation.

Mesure de la hauteur de l'atmosphère. — Nous avons indiqué à propos de cette éclipse une méthode nouvelle pour mesurer la hauteur de l'atmosphère, ou du moins celle à laquelle elle cesse d'être illuminée sensiblement par les rayons solaires.

On sait que Lambert et Biot ont mesuré la hauteur de l'atmosphère en se servant de *l'arc crépusculaire*, qui est formé par l'ombre de la Terre elle-même dans l'atmosphère.

L'observation directe de l'arc crépusculaire est d'ailleurs difficile, et les valeurs trouvées par Lambert et Biot sont beaucoup trop faibles. Liais a repris

Fig. 1.



ces mesures au moyen du polariscope, et cette méthode paraît meilleure que l'observation directe.

Pendant une éclipse totale, l'ombre de la Lune découpe dans l'atmosphère un cylindre à l'intérieur duquel l'atmosphère n'est pas éclairée par le Soleil. Il en résulte donc, autour du Soleil, un cercle de 10° de diamètre environ qui devrait paraître absolument noir, s'il n'était éclairé par la lumière venant des autres parties du ciel. Il est évident que le diamètre angulaire α de ce cercle permet de déterminer la hauteur H de l'atmosphère par la formule

$$H = \frac{D \sin h}{\tan \alpha},$$

h représentant la hauteur du Soleil au-dessus de l'horizon, D le diamètre de l'ombre de la Lune.

Il y aura donc intérêt, aux éclipses prochaines, à chercher à apercevoir ce cercle plus sombre dans le ciel, et à en mesurer le diamètre. On pourra aussi

observer la polarisation à une certaine distance du Soleil, du côté où avance la Lune, et noter le moment où la polarisation, primitivement horizontale, par exemple, devient verticale. On obtiendra ainsi la largeur du cercle qui n'est éclairé que par les rayons secondaires de l'atmosphère, et par suite la hauteur de celle-ci. La polarisation étant généralement verticale dans le voisinage du Soleil éclipsé, il faudrait prendre un point du ciel situé à gauche ou à droite et à la même hauteur que le Soleil, et voir à quel moment la polarisation passe du plan horizontal au plan vertical.



CHAPITRE II.

LE SOLEIL.



Historique. — La lumière directe du Soleil n'est pas polarisée ; la lumière des bords mêmes ne présente aucune trace de polarisation. *Arago* en a conclu que cette lumière ne pouvait être rayonnée par un corps solide ou liquide et qu'elle émanait de particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère du Soleil. En effet, la lumière qui émane obliquement des solides ou des liquides incandescents est polarisée par la réfraction des rayons venant des couches profondes du corps incandescent. *Arago* a même étendu cette théorie aux étoiles, parce que, pour les étoiles variables dont la variation est due à des satellites obscurs, la polarisation des rayons émis par certains points du bord ne serait pas détruite par celle des points opposés et qu'on devrait donc trouver la lumière polarisée si ces astres étaient des solides ou des liquides incandescents.

Aucune observation sur la polarisation dans le Soleil n'a été faite entre l'époque d'*Arago* et les expériences de *Hale*.

Hale ⁽¹⁾ remarqua que, d'après les clichés obtenus avec le spectrohéliographe et la raie H_{α} , les gaz de l'atmosphère solaire formaient de véritables tourbillons autour des taches ; il en conclut qu'il devait en résulter un champ magnétique dirigé suivant l'axe de la tache perpendiculairement à la surface, si les corpuscules électrisés positivement ou négativement étaient en nombre différent. Si le champ magnétique est assez fort, il doit en résulter un dédoublement des

(1) *Contribut. to the Mount Wilson Solar Observatory*, t. XXVI; *Astroph. Journal*, t. XXVIII, 1908, p. 100.

lignes des taches. Or Young et Mitchell avaient précisément observé visuellement des doublets dans le spectre des taches. Hale vérifia le fait photographiquement et montra que ces doublets sont bien dus à l'effet Zeeman. Pour cela, il plaça un rhomboèdre de Fresnel et un nicol devant la fente du spectroscopie et montra que l'intensité relative des composantes du doublet changeait suivant la position du nicol. Les composantes sont donc polarisées circulairement en sens opposé, comme cela a lieu dans l'effet Zeeman. Une vérification précieuse de ces résultats consiste dans le fait que les raies telluriques ne changent pas quand on tourne le nicol ; il en est de même des cannelures du cyanogène ; or, on sait que les spectres cannelés ne sont pas affectés par l'effet Zeeman. Les taches sont donc des tourbillons de matière électrisée.

Travaux personnels. — En 1905, j'avais avancé ⁽¹⁾ que le Soleil devait avoir un champ magnétique dirigé à peu près suivant son axe et produit par le mouvement de rotation des particules électrisées qui entourent l'astre ; nous verrons au Chapitre suivant la méthode que j'ai employée pour mettre ce champ en évidence. La découverte de Hale est venue confirmer mes vues sur ce point ; elle prouve, en effet, que la surface du Soleil est électrisée dans le voisinage des taches et que son mouvement de rotation crée un champ magnétique.

Mais ces masses électrisées tournent aussi autour de l'axe du Soleil, en vertu du mouvement de rotation de l'astre sur lui-même ; elles doivent donc créer, comme je le pensais, un champ magnétique dirigé à peu près suivant l'axe de rotation du Soleil. De plus, la valeur du champ magnétique dans les taches solaires, mesuré par Hale, va nous permettre de calculer la valeur du champ magnétique solaire. Cette valeur est extrêmement importante à connaître, au moins grossièrement, car il importe de savoir si le champ magnétique solaire peut bien produire les effets qu'on lui a attribués, sinon dans la théorie de Bigelow, du moins dans les théories plus modernes sur la couronne, les queues des comètes, etc. Enfin, il est très important de savoir l'ordre de grandeur du champ magnétique solaire pour juger de l'effet que ce champ peut avoir sur les variations des éléments météorologiques terrestres. Le Soleil n'agirait pas alors en tant qu'aimant, mais par le champ magnétique produit par le mouvement de la Terre autour du Soleil chargé d'électricité, comme l'a montré M. Bosler ⁽²⁾.

Nous n'avons pas de raisons de supposer que l'électrisation de la surface solaire est limitée aux alentours des taches ; nous pouvons donc supposer que le

⁽¹⁾ *Rapport au Bureau des Longitudes*, p. 5.

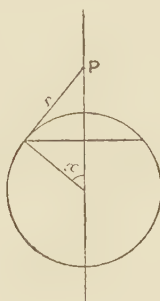
⁽²⁾ *Bulletin astronomique*, 1909, p. 271.

Soleil possède une charge électrique qui s'est répartie d'elle-même à peu près uniformément sur cette surface sphérique. Le mouvement tourbillonnaire de la surface autour des taches produirait le champ magnétique décelé par l'effet Zeeman, tandis que le mouvement de rotation de la sphère entière autour de son axe créerait le champ solaire.

Dans ces conditions on peut évaluer la grandeur du champ solaire d'après la valeur de celui des taches mesurée par Hale.

Calculons la valeur du champ solaire en un point P de l'axe de rotation situé à une distance m du centre, le rayon du Soleil étant pris comme unité; soit D

Fig. 2.



la densité électrique de la surface. Une zone de distance polaire x et de largeur dx porte une masse d'électricité q ,

$$q = 2\pi D \sin x \, dx;$$

cette zone agit comme un courant d'intensité i ,

$$i = \frac{q}{T},$$

$$i = v D \sin x \, dx,$$

en supposant d'abord constante la durée T de rotation, c'est-à-dire en ne tenant pas compte de la loi de Carrington, et en désignant par v la vitesse linéaire d'un point de la surface à l'équateur. Soit r la distance du point de l'axe considéré à la surface de la zone, le champ magnétique produit par la zone vaudra

$$\varphi = 2\pi v D r^{-3} \sin^3 x \, dx,$$

et le champ total donné par la sphère sera

$$\Phi = 2\pi v D \int_0^\pi r^{-3} \sin^3 x \, dx.$$

Cette intégrale peut se calculer et vaut

$$\frac{1}{2} \frac{\pi \nu D}{m^3} \left[-\frac{r^3}{3} + 2(1+m^2)r + (1-m^2)^2 \frac{1}{r} \right].$$

Il faut distinguer deux cas, suivant que le point de l'axe est à l'intérieur ou à l'extérieur de la sphère. Dans le premier cas, il faut intégrer entre $r = 1 - m$ et $r = 1 + m$. On trouve alors

$$\Phi = \frac{8}{3} \pi \nu D.$$

Le champ magnétique est donc constant dans tout l'intérieur de la sphère. Dans le second cas il faut intégrer entre $r = m - 1$ et $r = m + 1$, et l'on a

$$\Phi = \frac{8}{3} \pi \nu D \frac{1}{m^3}.$$

Le champ varie en raison inverse du cube de la distance, ce qu'on savait déjà. Faisons dans cette formule successivement $m = 1$, et $m = 1,5$; nous trouvons pour Φ les valeurs $2,7 \pi \nu D$ et $0,8 \pi \nu D$.

Nous allons maintenant tenir compte de l'accélération équatoriale qui a pour effet de diminuer le champ magnétique produit par la rotation du Soleil. Une zone de distance polaire x agit comme un courant d'intensité

$$i = \frac{2\pi}{T} D \sin x \, dx;$$

T représente la durée de rotation à la latitude considérée. Or on a, d'après la formule de Faye,

$$\frac{2\pi}{T} = \nu - a \cos^2 x.$$

L'intégrale Φ devient donc

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= 2\pi \nu D \int_0^\pi r^{-3} \sin^3 x \left(1 - \frac{a}{\nu} \cos^2 x \right) dx, \\ \Phi_1 &= \left(1 - \frac{a}{\nu} \right) \Phi + 2\pi \nu D \frac{a}{\nu} \Phi'', \end{aligned}$$

en posant

$$\Phi'' = \int_0^\pi r^{-3} \sin^5 x \, dx.$$

Or, cette intégrale peut se calculer. Pour un point situé au pôle, on trouve $\Phi'' = 0,61$; pour un point situé à la distance $1,5$, on a $\Phi'' = 0,19$. $\frac{a}{\nu}$ vaut $0,21$ d'après la formule de Faye. On a donc pour valeur du champ, en

ces deux points de l'axe, $2,4\pi vD$ et $0,7\pi vD$. Pour un point situé entre le pôle et la couronne moyenne (c'est-à-dire à peu près à l'endroit où je l'ai cherché par la méthode polariscopique), on a donc en moyenne

$$\Phi = 1,5\pi vD.$$

La valeur du champ magnétique observé dans les taches va nous permettre maintenant d'évaluer la densité inconnue D . En effet, un anneau de la surface de largeur da et de rayon a , tournant avec une vitesse linéaire V , produit un champ φ'

$$\varphi' = 2\pi vD \frac{da}{a}.$$

Le champ total produit au centre d'une tache par le mouvement de rotation de la surface vaut donc

$$\Phi' = 2\pi D \int_{a_1}^{a_2} \frac{V}{a} da,$$

l'intégrale étant étendue à la zone comprise entre les limites a_1 et a_2 de la zone troublée. Les formes et les vitesses des tourbillons solaires sont évidemment très variables; mais nous ne cherchons qu'une évaluation de la grandeur du champ de la tache et non sa mesure exacte.

Nous pouvons donc supposer, par exemple, que V est constant dans la zone troublée, c'est-à-dire entre les valeurs a_1 et a_2 qui correspondent au rayon de l'ombre et au rayon de l'extrémité de la pénombre. On peut supposer encore que V est proportionnel à la distance a du centre de la tache, la rotation se faisant uniformément autour du centre. On a dans le premier cas

$$\Phi' = 2\pi vD \log \frac{a_2}{a_1},$$

et dans le second

$$\Phi' = 2\pi vD \frac{a_2 - a_1}{a_2},$$

V représentant la plus grande vitesse linéaire dans le tourbillon. a_2 et a_1 étant du même ordre de grandeur, on voit que Φ' est de l'ordre de grandeur de $2\pi vD$.

On peut encore supposer que la distribution des vitesses est la même que dans un tube de tourbillon homogène de rayon R dans un liquide homogène indéfini. Si l'on cherche le champ produit par un tourbillon liquide remplissant ces conditions, on voit qu'à l'extérieur du tube de tourbillon, V est inversement proportionnel à a ; à l'intérieur du tube, V est proportionnel à a . En appe-

lant V , la valeur de la vitesse linéaire sur le cercle du tube de tourbillon, on a donc dans le premier cas

$$V = \frac{a_1 V_1}{a},$$

et dans le second

$$V = \frac{V_1}{a_1} a.$$

On a donc

$$\Phi' = 2\pi D \int_{a_0}^{a_1} \frac{V_1}{a_1} da + 2\pi D \int_{a_1}^{\infty} \frac{a_1 V_1}{a^2} da$$

ou

$$\Phi' = 4\pi V_1 D,$$

valeur qui est encore du même ordre de grandeur que les précédentes, bien qu'on ait supposé une surface tournant jusqu'à l'infini, ce qui n'est évidemment pas le cas. Nous pouvons donc prendre cette dernière appréciation de la valeur du champ des taches. Comparons-la à la valeur trouvée pour le champ solaire

$$\Phi = 1,5\pi c D,$$

il vient

$$\Phi = 0,4 \frac{V}{V_1} \Phi'.$$

Or Φ' est connu par les expériences de Hale et vaut environ 2900 C. G. S., c vaut 2^{km} par seconde. Les plus grandes vitesses observées dans les protubérances dépassent rarement 100^{km} ou 200^{km} , exceptionnellement 500^{km} . On a donc finalement

$$\Phi > 4 \text{ C. G. S.}$$

Le champ magnétique solaire serait donc au moins de l'ordre de dix fois le champ terrestre.

Il est évident que cette conclusion est en partie hypothétique, puisqu'elle suppose que le champ produit par la couche considérée n'est pas détruit par une couche contiguë de signe contraire précisément égale; ce qui est possible, bien que peu vraisemblable. Le calcul que nous venons de faire ne mesure donc pas rigoureusement le champ solaire, mais en montre l'ordre de grandeur probable. Nous verrons à propos des comètes l'importance de cette évaluation.



CHAPITRE III.

POLARISATION DE LA COURONNE SOLAIRE ET DES PROTUBÉRANCES.

Historique. — Dès 1842, en vue de l'éclipse de Soleil qui devait être visible dans le midi de la France, *Arago* ⁽¹⁾ signalait l'importance des observations polariscopiques de la couronne solaire pour décider si la lumière coronale était due à la réflexion de la lumière du Soleil dans une atmosphère diaphane entourant cet astre. Il observa lui-même l'éclipse à Perpignan et reconnut, avec un polariscope à lunules, que la lumière était polarisée sur la couronne, mais aussi sur les parties du ciel environnantes et sur la Lune elle-même. Il remarqua le premier que la polarisation de la couronne pouvait, par conséquent, être produite par la superposition de la lumière de l'atmosphère provenant, par des réflexions multiples, des parties du ciel éclairées par le Soleil. Il ne put mesurer la proportion de lumière polarisée sur la couronne et sur la Lune et, par suite, ne put décider si la couronne était polarisée par elle-même. *Mauvais* ⁽²⁾, son collaborateur, se servit d'un polariscope de Savart. Il vit les bandes de polarisation sur la Lune et sur la couronne, mais elles paraissaient plus vives sur la couronne, ce qui semblait prouver que la lumière coronale était vraiment polarisée. Pourtant, à la même éclipse, *Pinaud* et *Boisgiraud* ⁽³⁾ ne voyaient aucune trace de polarisation.

Pendant l'éclipse de 1851, *Airy*, *Dunkin* ⁽⁴⁾, *Carrington* ⁽⁵⁾ n'obtinrent pas de résultat, mais *d'Abbadie* ⁽⁶⁾ reconnut l'existence de la polarisation coronale au moyen d'une plaque de quartz et d'un prisme biréfringent. *Mauvais* reconnut aussi la polarisation.

A cette époque on avait donc reconnu la polarisation, mais sans déterminer la position du plan de polarisation, et cette lacune, jointe aux contradictions des observations, rendait encore douteuse l'existence de la polarisation coronale.

En 1858, *Liais* ⁽⁷⁾, observant au Brésil, se servit d'une tourmaline et d'un

(1) *Astronomie populaire*, t. III, p. 609; *Annuaire du Bureau des Longitudes pour 1846*, p. 402.

(2) *Annuaire du Bureau des Longitudes pour 1846*, p. 404.

(3) *Ibid.*, p. 405.

(4) *Mem. of the R. Astron. Society*, t. XXI, Part I, p. 12.

(5) *Ibid.*, p. 63.

(6) *Comptes rendus*, t. XXXVIII, 1854, p. 295.

(7) *Comptes rendus*, t. XLVII, 1858, p. 786; t. LI, 1860, p. 766; *Astr. Nachr.*, t. XLIX, p. 288.

polariscope de Savart. Il trouva une polarisation nettement accusée sur la couronne dans toutes ses parties, y compris les rayons de l'aurole; cette polarisation était d'autant plus évidente que la polarisation atmosphérique présentait précisément un point neutre dans la région où se trouvait le Soleil.

Liais détermina pour la première fois la position du plan de polarisation qui était partout normal au limbe. Il examina aussi les protubérances avec un prisme biréfringent et il observa que les deux images avaient la même intensité, ce qui prouve que la lumière des protubérances n'est pas polarisée.

Prazmowski ⁽¹⁾, en 1860, fit une observation très précise de la position du plan de polarisation; il se servait d'une plaque de quartz à double rotation placée au foyer de l'objectif, et d'un nicol placé dans l'oculaire. Le plan de polarisation était partout radial ⁽²⁾. La polarisation était très vive, et son maximum d'intensité était situé à une certaine distance du bord de la Lune. *Prazmowski* examina aussi les protubérances avec un quartz simple et un prisme biréfringent. Les images de la couronne étant peu séparées donnaient un fond blanc sur lequel se détachaient les deux images de la protubérance, images qui étaient complètement séparées. Ces images ne présentaient aucune coloration.

Secchi ⁽³⁾ observa aussi la polarisation de la couronne. *D'Abbadie* ⁽⁴⁾ trouva que les protubérances n'étaient pas polarisées, contrairement à une observation qu'il avait faite en 1851. Cette absence de polarisation fut toujours confirmée aux éclipses suivantes, notamment par *Campbell* ⁽⁵⁾ en 1868. Les rares observations de polarisation des protubérances [*Kutczicki* en 1850, *d'Abbadie* et *Riis* ⁽⁶⁾ en 1851, *Lockyer* ⁽⁷⁾ en 1871] peuvent s'expliquer par quelque imperfection instrumentale ou quelque vice d'observation. La dernière observation, notamment, était faite avec un polariscope de Savart donnant des bandes trop espacées. Nous avons obtenu pour la première fois en 1905 des photographies de bandes assez serrées pour pouvoir servir à l'étude de la polarisation des protubérances.

A partir de 1860, les observations polariscopiques de la couronne deviennent très nombreuses. Nous ne pouvons que citer les principaux observateurs.

(1) *Comptes rendus*, t. LI, 1860, p. 195.

(2) Ce résultat fut aussi trouvé par *Edlund* (*Astron. Nachr.*, t. LII, 1860, p. 305).

(3) *Comptes rendus*, t. LI, 1860, p. 156.

(4) *Ibid.*, p. 703.

(5) *Proc. of the Royal Society*, t. XVII, p. 120.

(6) *Comptes rendus*, t. XXXVIII, 1854, p. 295.

(7) *Nature*, t. V, 1871, p. 218.

Campbell ⁽¹⁾ en 1868, *Langley*, *Pickering* ⁽²⁾, *Blaserna* ⁽³⁾, *Ranyard* ⁽⁴⁾ en 1870, *Tupmann*, *Lewis* ⁽⁵⁾ en 1871 déterminent la position du plan de polarisation qu'ils trouvent partout normal au limbe. Ces observations ne font donc plus que confirmer les résultats généraux mis en évidence par *Liais* et *Prazmowski*.

Pourtant quelques observateurs, parmi lesquels *Pickering* ⁽⁶⁾ en 1869, *Moulton* en 1870 ⁽⁷⁾, ne virent pas de polarisation, ce qui peut s'expliquer peut-être par la superposition de nuages ou de brumes dont la lumière n'est pas polarisée. Quelques rares observateurs crurent trouver que le plan de polarisation n'était pas radial, mais ces observations paraissent sûrement erronées.

En 1876, *Harkness* et *Wright* ⁽⁸⁾ firent une étude photographique très détaillée de la polarisation de la couronne. Certaines de ces observations semblaient montrer que le plan de polarisation n'était pas partout exactement radial et même était peut-être fortement dévié. C'est cette déviation que j'ai attribuée, comme nous le verrons plus loin, au champ magnétique solaire et que j'ai cherché à mettre sûrement en évidence en 1905 par des photographies de bandes de Savart serrées sur la couronne.

Citons ensuite les recherches de *Turner* ⁽⁹⁾ en 1898; la recherche d'une polarisation elliptique possible de la lumière coronale par *M. Joubin* ⁽¹⁰⁾ en 1900.

Enfin, en 1900, *Newall* et *Turner* ⁽¹¹⁾ firent les premières photographies de bandes de Savart sur la couronne, mais en plaçant directement le Savart devant l'objectif d'une chambre photographique, ce qui ne permet d'obtenir que deux ou trois bandes au plus sur le diamètre du Soleil. *Newall* et *Turner* disposaient pourtant de plaques de quartz extrêmement volumineuses, leur nicol avait 3^{cm}, 8 de diamètre, ainsi que les plaques de Savart. Ces plaques avaient 1^{cm}, 5 d'épaisseur et donnaient, par conséquent, des bandes espacées de 10' au lieu de 1° à 1°, 5 comme cela a lieu dans les polariscopes habituels.

Malgré ces dimensions extrêmement rares et malgré la grande distance focale

⁽¹⁾ *Proc. of the Royal Society*, t. XVII, p. 120.

⁽²⁾ *Unit. States Coast Survey Report*, 1870, Append. 16.

⁽³⁾ *Rapporti della Commissione Italiana*, p. 48.

⁽⁴⁾ *Mem. of the R. Astron. Society*, t. XLI, 1879, p. 312.

⁽⁵⁾ *Report of the Eclipse Expedition*, 1870.

⁽⁶⁾ *Journal of the Franklin Institute*, t. LXXXVIII, p. 285.

⁽⁷⁾ *Report of the Eclipse Expedition*, 1870.

⁽⁸⁾ *Washington Observations*, 1876, Append. 3, p. 278.

⁽⁹⁾ *Proc. R. Soc.*, t. LXIV, 1898, p. 10; *Monthly Notices*, t. LVIII, 1898.

⁽¹⁰⁾ *Comptes rendus*, t. CXXX, 1900, p. 1597.

⁽¹¹⁾ *Monthly Notices*, t. LX, 1900, Append. 10; *Proc. of the Royal Society*, t. LXVII, 1900, p. 356.

(90^{cm}) de la lunette comparée à son ouverture, on ne pouvait obtenir que trois bandes sur la largeur du diamètre solaire. En 1905, M. Newall a repris les mêmes observations avec la même disposition du polariscope. Citons enfin les observations de la proportion de lumière polarisée de *Landerer* ⁽¹⁾, de *M. Meslin* ⁽²⁾.

Travaux personnels. — Envoyé en mission en Algérie pour l'observation de l'éclipse totale du Soleil du 30 août 1905, j'ai dirigé mes recherches principalement dans le sens de la polarisation. Les parties du programme d'observations se rapportant à ce sujet étaient les suivantes :

1^o Étude de la distribution et de l'intensité de la lumière polarisée de la couronne et recherche d'une déviation possible de son plan de polarisation par un champ magnétique solaire ;

2^o Observation de la polarisation atmosphérique (nous avons étudié ces observations au Chapitre I) ;

3^o Étude de la spectropolarisation de la couronne et essai d'un procédé nouveau, basé sur cette étude, et permettant de trouver de nouvelles radiations monochromatiques d'origine sûrement coronale.

Le programme comprenait de plus la photographie du spectre ultraviolet (voir *Spectroscopie astronomique*, p. 289 et planche hors texte), la photographie de la couronne (voir *Rapport*, Pl. III et IV), le dessin de la couronne à l'œil nu (*Rapport*, Pl. V), le relevé des courbes du baromètre et du thermomètre enregistreur, etc.

En raison de la petitesse des instruments que nous pouvions employer, et qui nous appartenaient personnellement, nous devions nous occuper plus spécialement des parties du programme concernant la polarisation. Ces recherches présentaient, en effet, grâce à leur nouveauté, un certain intérêt scientifique malgré le manque d'instruments de grande dimension.

En ce qui concerne la polarisation coronale, les questions à résoudre étaient les suivantes :

La lumière de la couronne est-elle ou non fortement polarisée ? Cette lumière s'étend-elle jusqu'aux limites de la couronne extérieure et sur la couronne intérieure ? Le plan de polarisation est-il exactement radial ?

Toutes ces questions sont très importantes pour l'étude de la Physique

(¹) *Comptes rendus*, t. CXXX, 1900, p. 1594 ; t. CXLI, 1905, p. 589.

(²) *Comptes rendus*, t. CXLI, 1905, p. 493.

solaire. En effet, la forte polarisation de la couronne semble incompatible, au premier abord, avec la nature de son spectre qui paraît, du moins pour la couronne moyenne, purement continu. Nous verrons plus loin les explications que l'on peut donner de cette anomalie.

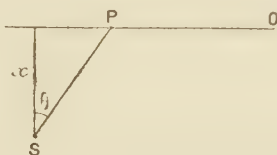
La connaissance de la distribution de la lumière polarisée est également indispensable pour l'étude de la constitution de la couronne. On admettait généralement jusqu'ici ⁽¹⁾ que la couronne intérieure n'est pas sensiblement polarisée. Nous avons prouvé le contraire et nous verrons les conséquences qu'on en peut tirer.

Théorie de la polarisation coronale. — On peut se rendre compte théoriquement que la proportion de lumière polarisée de la couronne doit croître quand le point observé s'éloigne du Soleil.

Supposons, en effet, que la lumière coronale soit produite par la diffusion de la lumière solaire sur de très petites particules; supposons que ces particules soient réparties uniformément et admettons d'abord qu'elles ne soient pas incandescentes ni en suspension dans un gaz incandescent.

On peut supposer d'abord, comme l'a fait Ranyard ⁽²⁾, que le Soleil soit réduit à un point géométrique. Soient S ce point, P une particule, PO la direc-

Fig. 3.



tion de l'observateur, x la distance de PO à S, θ le complément de l'angle de PO avec PS.

On peut admettre que la particule P, illuminée par le point S, n'émet que des vibrations situées dans le plan perpendiculaire à la droite SP. Les vibrations qui produisent de la lumière dans la direction PO sont celles qui sont perpendiculaires à cette direction. Les vibrations émises par P se diviseront donc en deux groupes : celles qui sont perpendiculaires au plan de la figure et qui seront intégralement transmises, et, d'autre part, celles qui sont parallèles

⁽¹⁾ Voir BIGOURDAN, *Les éclipses de Soleil*, p. 138.

⁽²⁾ *Mem. of the R. Astron. Society*, t. XLI, 1879.

au plan de la figure et dont l'amplitude, comptée perpendiculairement à PO, sera multipliée par le facteur $\sin \theta$.

Remarquons que nous admettons que le maximum de polarisation pour un rayon diffusé dans un milieu trouble a lieu dans une direction faisant un angle de 90° avec le rayon.

Thomson ⁽¹⁾ a montré que le maximum de polarisation ne doit pas être à 90° , mais bien à 120° pour les corps conducteurs, si les particules sont assez petites. *Ehrenhaft* ⁽²⁾ l'a vérifié et a montré aussi l'absorption qui se produit dans ce cas par le phénomène de la résonance optique. Nous supposons donc que la polarisation se produit dans la couronne comme dans l'atmosphère, c'est-à-dire que les particules ne sont pas conductrices ou sont suffisamment grosses pour que l'effet Thomson n'existe pas.

L'amplitude des vibrations émises par P est inversement proportionnelle à $SP = \frac{x}{\cos \theta}$. L'amplitude des vibrations émises par P, d'une part perpendiculairement au plan de la figure, d'autre part parallèlement à ce plan, vaut donc

$$\frac{\alpha \cos \theta}{x} \quad \text{et} \quad \frac{\alpha \cos \theta \sin \theta}{x},$$

α désignant la valeur de l'amplitude à l'unité de distance de S.

Soient β et γ les intensités totales résultant de la lumière de toutes les particules situées sur la droite PO entre les limites de la couronne, β étant l'intensité des vibrations parallèles au plan de la figure, γ celle des vibrations perpendiculaires à ce plan; on a

$$\beta^2 = 2 \int_0^{x \tan \theta} \frac{\alpha^2}{x^2} \cos^2 \theta \sin^2 \theta d(x \tan \theta) = \frac{\alpha^2}{x} (\theta - \sin \theta \cos \theta)$$

et

$$\gamma^2 = 2 \int_0^{x \tan \theta} \frac{\alpha^2}{x^2} \cos^2 \theta d(x \tan \theta) = \frac{2\alpha^2}{x} \theta.$$

L'étude de la variation du rapport de β à γ montre que la polarisation augmente avec la distance x au Soleil.

Il est plus simple de voir le fait géométriquement. Si l'on considère (*fig. 4*) deux droites PO, P'O' correspondant à deux valeurs voisines de x et qu'on fasse correspondre les particules P, P', il est clair que la particule P' aura un angle θ plus faible, par exemple, que la particule P et que, par suite, la proportion de

⁽¹⁾ *Philosoph. Magaz.*, t. XXXVIII, 1894, p. 445.

⁽²⁾ *Annalen der Phys.*, 4^e série, t. II, 1903, p. 489.

lumière polarisée donnée par chaque particule de la droite $P'O'$ sera supérieure à la proportion de lumière polarisée donnée par chaque particule de la droite PO .

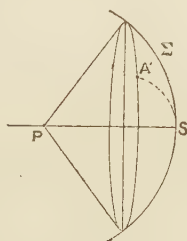
Mais ce n'est pas là la principale cause de variation de la proportion de

Fig. 4.

$$\frac{P' \quad O'}{P \quad O}$$

lumière polarisée avec la distance au Soleil. Faisons intervenir maintenant le fait que le Soleil a un diamètre apparent et que, par suite, les rayons venant de ses bords et se réfléchissant sur une particule ne sont pas polarisés dans le plan de la particule et du centre de l'astre. *Schuster* ⁽¹⁾ a calculé la variation de la proportion de lumière polarisée donnée par une particule à différentes distances d'une sphère lumineuse. On peut se rendre compte simplement par la Géométrie que la polarisation augmente avec la distance. En vertu de la loi du cosinus, l'état d'une particule éclairée par le Soleil est le même que si elle se trouvait au centre d'une sphère de rayon égal à l'unité et était éclairée par la calotte sphérique Σ , d'intensité uniforme, découpée dans cette sphère par un cône circulaire ayant son sommet en P (*fig. 5*). Il suffit donc de voir comment varie la polarisation en P quand la calotte sphérique Σ augmente. Considérons deux zones voisines (*fig. 6*) et faisons correspondre les éléments de surface A , A' de ces deux zones qui correspondent à un même plan passant par PS ; il est facile de se rendre compte que la proportion de lumière polarisée donnée par chaque

Fig. 5.



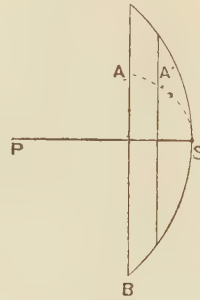
élément A' de la première zone est supérieure à celle de l'élément correspondant de la seconde. Cela tient à la fois à ce que la droite PA' est moins inclinée sur le plan de figure PBS que la droite PA , et à ce que sa projection sur le plan PBS fait un angle moindre avec la droite PS . La proportion de lumière polarisée donnée par des zones successives diminuant quand la calotte sphérique aug-

(1) *Monthly Notices*, t. XL, 1879, p. 35.

mente, la proportion de lumière polarisée donnée par la calotte entière doit diminuer quand elle augmente, c'est-à-dire quand la particule s'approche du Soleil.

Ces considérations géométriques permettent de se rendre compte facilement aussi que la polarisation doit être nulle quand la particule est près de la surface.

Fig. 6.



En effet, la polarisation serait nulle si la particule était entourée d'une sphère lumineuse entière; elle est donc nulle aussi pour une demi-sphère, puisque l'intensité des vibrations polarisées dans une direction quelconque sera seulement diminuée de moitié.

On pourrait croire qu'il en résulte que la polarisation doit être nulle dans la couronne intérieure. Mais il faut remarquer que les particules situées sur le rayon tangent à la surface du Soleil et loin du point de contact, polarisent la lumière ⁽¹⁾. Il n'y a donc pas d'impossibilité théorique à trouver que la lumière de la couronne intérieure est polarisée, comme nous l'avons montré expérimentalement pour la première fois en 1905.

Schuster a étudié la variation de la polarisation de la couronne et a trouvé que la polarisation augmente avec la distance au Soleil si la densité des particules varie en raison inverse d'une puissance de la distance au Soleil. Mais il y a encore une autre cause de variation de la proportion de lumière polarisée. Les particules sont rendues incandescentes par le voisinage du Soleil. Celles qui sont situées plus près de l'astre doivent donner une lumière neutre plus intense et la proportion de lumière polarisée doit augmenter encore de ce fait avec la distance au Soleil.

La température est, en effet, largement suffisante pour porter les particules à l'incandescence, comme l'ont remarqué Scheiner ⁽²⁾ et M. Nordmann ⁽³⁾.

(1) Voir SCHUSTER, *loc. cit.*

(2) *Astr. Nachr.*, t. CLII, 1900, p. 369.

(3) *Thèse de Doctorat*, p. 35.

En se basant sur la loi de Stefan, on trouve que, pour deux particules situées respectivement à des distances égales à un et à cinq diamètres de la surface solaire, les températures absolues T seraient

$$T = 2500^{\circ} \quad \text{et} \quad T = 1400^{\circ}$$

(M. Nordmann a trouvé par erreur dans ces deux cas $T = 2884^{\circ}$ et $T = 2065^{\circ}$). Quoi qu'il en soit, cette température est bien suffisante pour porter les particules à l'incandescence.

Enfin, la lumière monochromatique des gaz de la couronne s'ajoute encore à la lumière diffusée. Les gaz doivent être d'autant plus lumineux qu'ils sont situés plus près du Soleil; il en résulte encore une cause d'augmentation de la polarisation avec la distance du point de la couronne considéré au Soleil.

La polarisation devrait donc, théoriquement, être maxima à la limite de la couronne extérieure. Ce n'est pas ce qu'on a observé. Nous avons vu, en effet, qu'on a trouvé généralement que le maximum de polarisation était situé à une certaine distance de l'astre, mais non pas à la limite de la couronne.

La question de la déviation du plan de polarisation coronal est des plus intéressantes. Nous avons indiqué ⁽¹⁾ comment, si le Soleil a un champ magnétique sensible, ce champ, s'exerçant dans l'atmosphère gazeuse de la couronne, doit avoir pour effet de dévier le plan de polarisation qui, sans cela, par raison de symétrie, devrait être exactement radial. Ce phénomène serait analogue à celui de la déviation du plan de polarisation atmosphérique par le champ magnétique terrestre découvert par Becquerel ⁽²⁾.

Nous verrons plus loin que, d'après une théorie présentée d'abord par Wiedemann et Schmidt ⁽³⁾ et qui a trouvé récemment un appui dans les expériences de Wood sur la polarisation de la lumière fluorescente des vapeurs métalliques ⁽⁴⁾; le spectre de la couronne ne paraîtrait continu que par suite de la dispersion insuffisante et serait, en réalité, un spectre de bandes indiquant la présence de vapeurs métalliques connues. La couronne serait donc formée de vapeurs connues et en densité très forte, d'après l'intensité de sa lumière.

Nous connaîtrions donc la nature des vapeurs de la couronne et, par suite, la valeur moyenne de leur pouvoir rotatoire magnétique. Si l'on admet, de plus,

⁽¹⁾ *Bulletin astronomique*, 1905, p. 230.

⁽²⁾ *Journal de Physique*, 1^{re} série, t. VIII et IX; *Ann. de Chim. et de Phys.*, t. XIX, 1880, p. 117.

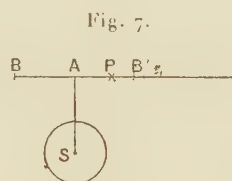
⁽³⁾ *Astrophysical Journal*, t. III, 1896, p. 207.

⁽⁴⁾ *Id.*, t. XXVIII, 1908, p. 75.

les données hypothétiques qu'on peut avoir sur la constitution de la couronne, la mesure de la déviation du plan de polarisation permettrait même d'évaluer le champ magnétique solaire.

On pourrait objecter que la lumière d'un point de la couronne venant de particules situées sur toute la longueur du rayon visuel traversant la couronne, il en résulte une quantité de déviations partielles qui peuvent s'annuler. Mais, si l'on néglige l'absorption, on peut démontrer que, quelle que soit la loi de distribution des particules et des gaz, pourvu que cette distribution ait lieu par couches concentriques, la déviation du plan de polarisation de la lumière totale est la même que celle d'une source unique dont la lumière traverserait la couronne.

En effet, soient P une particule, x sa distance au point A où le rayon visuel PO passe le plus près du Soleil, BB' les limites de la couronne (*fig. 7*). La particule P émet une quantité de lumière q polarisée dans le plan SPO. Le plan de



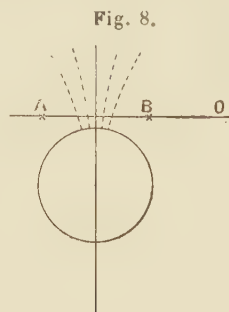
polarisation de cette quantité de lumière polarisée subit une déviation δ par suite de son passage dans la partie PB' de la couronne. Mais une particule symétrique de P par rapport à A émet une quantité de lumière polarisée égale q dont le plan de polarisation subit une rotation $\Delta - \delta$, Δ étant la rotation que produirait le passage d'un rayon de B à B'. La lumière résultant de ces deux quantités de lumière polarisée égales paraîtra polarisée dans un plan bissecteur de leurs plans de polarisation; la déviation du plan résultant de polarisation sera donc

$$\frac{\delta + \Delta - \delta}{2} = \frac{\Delta}{2}.$$

Les particules de la couronne donneront donc toutes, deux à deux, le même plan de polarisation, et la déviation sera la même que celle d'un rayon unique traversant la distance AB'.

Jusqu'à présent nous avons supposé que le champ magnétique était uniforme dans toute la partie de la couronne traversée par le rayon visuel. En réalité, si l'on vise près du pôle du Soleil, les choses sont plus compliquées. Le champ est perpendiculaire aux surfaces équipotentielles. Celles-ci sont faciles à calculer,

dans ce cas particulier, et donnent, pour les lignes de force, la disposition en aigrette bien connue par la théorie de Bigelow (*fig. 8*). Sans entrer dans le détail de ce calcul, nous remarquerons seulement que, même si l'axe solaire est perpendiculaire au rayon visuel, cette disposition a pour effet de donner une déviation magnétique du plan de polarisation. En effet, soient A un point de la couronne, B son symétrique par rapport à l'axe solaire, O la direction de



l'observateur, les déviations subies par le plan de polarisation de la lumière partie de A pendant le trajet AB se compensent, en admettant toujours que la densité des gaz de la couronne ne varie qu'avec la distance à la surface; mais le plan de polarisation est dévié pendant le trajet de B à la limite de la couronne. La lumière totale subit donc une déviation caractérisée par le sens de la projection du champ sur le rayon visuel dans la partie de la couronne tournée vers l'observateur. A l'autre pôle, la déviation aura lieu en sens contraire.

Si le Soleil est chargé d'électricité négative, son mouvement de rotation créera un champ de sens contraire que celui que donnerait un courant circulant dans le sens de rotation. D'autre part, la déviation magnétique du plan de polarisation pour les gaz et les vapeurs a lieu dans le sens d'un courant qui, par sa rotation, produirait le champ magnétique. On en conclut que, même si l'axe solaire est perpendiculaire au rayon visuel, il doit y avoir une rotation magnétique du plan de polarisation *dans le sens direct, ou dans le sens des aiguilles d'une montre, au pôle nord du Soleil et dans le sens inverse au pôle sud*. L'inclinaison de l'axe donne un effet qui s'ajoute ou se retranche suivant les cas de l'effet précédent; il faut chercher la déviation du plan de polarisation du côté où ces deux effets s'ajoutent, c'est-à-dire près du pôle où l'axe est dirigé vers la Terre. C'est ce que nous n'avons pas fait malheureusement en 1905, et c'est une des raisons pour lesquelles nous ne tirerons pas de conclusion de la mesure que nous avons faite. Nous voyons qu'à une prochaine éclipse il sera intéressant de chercher la déviation magnétique aux deux pôles du Soleil.

Pour ce qui est de la densité et de la nature des gaz ou des vapeurs de la couronne, il est difficile d'avancer quelque chose de certain. D'après la théorie de Wood, la couronne serait formée de vapeurs métalliques connues; d'après la théorie ordinaire, elle renfermerait un gaz inconnu, le coronium. On sait qu'en raison de l'épaisseur de l'atmosphère solaire comparée à celle de la Terre, et de la valeur de l'attraction 27 fois plus forte, la pression semble au premier abord devoir être considérable ⁽¹⁾. Mais l'absence de déplacement sensible des lignes dû à l'effet Humphreys-Mohler paraît incompatible avec de pareilles pressions. Cette question est loin d'être résolue et il y a encore des partisans de la croyance à une pression considérable ⁽²⁾. Pour lever la contradiction, on peut admettre l'existence d'une force répulsive émanée du Soleil. Nous avons fait remarquer ⁽³⁾ que, dans le cas des comètes, on était obligé de supposer une pareille force et que cette force est nécessairement *différente de la pression de Maxwell-Bartoli* qu'on invoque généralement. En effet, d'après les travaux de M. Schwarzschild, le rapport de la pression à l'attraction a un maximum quand le rayon des corpuscules repoussés vaut $0,2 \times 10^{-4}$ environ, et sa valeur permet alors d'expliquer les queues cométaires. Mais ce rapport décroît ensuite rapidement et devient extrêmement petit pour les molécules gazeuses, dont le rayon est de l'ordre de 10^{-8} . La pression de radiation de Maxwell-Bartoli, qui s'applique à des corpuscules solides, est donc inadmissible pour les molécules des gaz qui forment les queues des comètes. L'existence d'une pareille force dans le cas du Soleil semble aujourd'hui généralement admise ⁽⁴⁾. Enfin, remarquons que la constance de la constante de l'attraction pour des corps très différents de ceux sur lesquels on peut expérimenter est elle-même hypothétique ⁽⁵⁾.

Quoi qu'il en soit, on admet généralement que la densité des gaz ou des vapeurs dans la couronne est sensible, [quelle que soit l'hypothèse que l'on adopte pour lever la contradiction entre cette densité et le peu de déplacement des raies de la couche renversante. Il n'y a donc pas d'impossibilité à ce que la déviation magnétique ait une valeur sensible.

L'éclipse de 1905 arrivait à une époque de maximum de taches solaires. Or, on sait qu'à ce moment les raies noires du spectre de Fraunhofer sont plus facilement visibles dans le spectre coronal. En fait, on ne les a même observées qu'en 1871, 1882 et 1893, époques correspondant précisément à des intervalles

(1) Voir SCHUSTER, *Astr. Journ.*, t. XVII, p. 165.

(2) Voir la discussion entre MM. Wittaker et Evershed dans *Observatory*, 1909, *passim*.

(3) *Bulletin de la Société astronomique*, 1907, p. 325.

(4) Voir EVERSLED, *Observatory*, 1907.

(5) Voir SALET, *Bull. astr.*, 1902, p. 227.

de 11 années. La proportion de lumière polarisée devait donc être maxima en 1905. Les conditions étaient donc particulièrement favorables pour tenter cette étude.

Description de l'instrument employé. — Pour l'étude de la polarisation coronale, nous avons choisi le polariscope de Savart qui est, comme nous l'avons dit plus haut, d'une extrême sensibilité et qui de plus était très approprié aux recherches que nous allions entreprendre.

Nous avons vu dans la partie historique que M. Newall, plaçant un Savart de grandes dimensions devant l'objectif d'une chambre photographique, était arrivé à photographier en 1900 les bandes de polarisation sur la couronne. Mais ce dispositif ne convenait pas pour l'objet qui nous occupait, car il ne permet d'avoir que deux ou trois bandes sur le diamètre solaire. Or, il importait évidemment pour la recherche d'une déviation du plan de polarisation et aussi pour l'étude de la distribution de la lumière polarisée, d'avoir des bandes extrêmement serrées. De plus, nous tenions à pouvoir examiner visuellement les bandes dues à la polarisation atmosphérique et à les supprimer sûrement en tournant convenablement le Savart, de manière à être sûr que la polarisation observée venait bien de la couronne et non de la lumière atmosphérique superposée.

Pour toutes ces raisons nous avons décidé de placer le polariscope devant l'oculaire d'une lunette astronomique, ce qui permettait la mesure de la position du plan de polarisation et la suppression de la polarisation atmosphérique. Un appareil photographique pouvait se monter rapidement sur cet oculaire et permettait de photographier les bandes sur la couronne. Ce dispositif étant nouveau et les photographies de bandes serrées sur la couronne étant les premières qu'on ait obtenues, nous croyons devoir décrire sommairement l'appareil.

Sur un pied équatorial muni d'un mouvement d'horlogerie était placée une lunette de 95^{mm} d'ouverture et de 1^m,46 de longueur focale. L'oculaire, du type négatif, grossissait 14 fois seulement et donnait un champ de 1°,5; il pouvait tourner autour de son axe optique et être fixé dans la position adoptée. Dans son plan focal, un réticule, convenablement calculé, permettait de maintenir, avec la manette de mouvement lent en ascension droite, la Lune tangente entre deux fils; un troisième fil central, placé à égale distance entre les deux précédents, devait servir à mesurer la position du plan de polarisation en un point bien déterminé de la couronne.

Le polariscope était formé de deux plaques de quartz de 8^{mm} d'épaisseur, placées tout contre la lentille d'œil, et donnait des bandes écartées de 30'.

Comme analyseur, un nicol à faces perpendiculaires remplaçait la tourmaline employée habituellement, mais dont la teinte foncée et verdâtre est un obstacle à la photographie des bandes. La largeur du nicol avait été calculée, naturellement, de manière à encadrer exactement le faisceau lumineux. L'ensemble du polariscope tournait autour de son axe devant un cercle divisé en degrés, auquel il pouvait être fixé par une vis de serrage afin de faire la lecture à loisir après la totalité. Il est indispensable, dans les recherches de ce genre, de s'assurer que les pièces optiques placées devant le polariscope ne polarisent pas la lumière, ce qui peut arriver notamment pour les objectifs qui peuvent être légèrement trempés; nous avons donc vérifié que l'instrument, braqué sur un ciel complètement couvert, ne donnait pas de traces de bandes de polarisation.

Le dispositif que nous avons employé permet donc à la fois d'avoir des bandes très serrées (15 sur la largeur du diamètre du Soleil), de se servir d'un objectif aussi grand qu'on le désire et enfin de pouvoir observer visuellement et de supprimer avant l'observation photographique l'effet nuisible de la polarisation atmosphérique.

Observation de l'éclipse du 30 août 1905. — Nous avons calculé, d'après la position du Soleil dans le ciel, la position à donner à l'oculaire pour que les fils du réticule soient verticaux. Le polariscope était tourné de telle sorte que la frange centrale faisait un angle de 45° avec la direction des fils dans le sens dextrorsum.

Nous prévoyions, en effet, d'après les résultats des éclipses précédentes, que le plan de polarisation atmosphérique serait vertical et que, par suite, cette position du Savart supprimerait les bandes dues à la polarisation atmosphérique.

Lorsqu'au moment du second contact la couronne est apparue dans la lunette, on ne voyait, en effet, aucune bande sur le disque de la Lune. Les photographies que nous avons faites ensuite ne montrent aussi aucune trace de polarisation atmosphérique, bien que la lumière soit assez forte sur la Lune dans certains clichés pour permettre de voir nettement les fils du réticule se détacher en noir sur le fond éclairé. L'influence de la polarisation atmosphérique a donc été complètement supprimée et n'a pas pu fausser les résultats obtenus. Comme nous l'avons remarqué dans le premier Chapitre, ce fait ne prouve pas que le plan de polarisation fût vertical, comme je le croyais d'après les éclipses antérieures, mais bien qu'il était vertical ou horizontal. Il est évident d'ailleurs, par raison de symétrie, que lorsque l'observateur se trouve, comme c'était mon cas, à peu près sur la ligne centrale de la zone de totalité, le plan de polarisation

atmosphérique doit être vertical ou horizontal et que la position choisie pour le polariscope devait, en tout état de cause, supprimer les bandes de polarisation atmosphériques.

Les bandes de la couronne étaient très vives et, comme le plan de polarisation était sensiblement radial, elles présentaient près du fil vertical central une ligne de démarcation dépourvue de bandes. De part et d'autre de cette ligne, qui était très étroite en raison de la polarisation très marquée de la couronne, les bandes à frange centrale noire et celles à frange centrale blanche semblaient presque se rejoindre, mais étaient naturellement imbriquées les unes par rapport aux autres, les franges blanches d'un système étant dans le prolongement des franges noires de l'autre système.

L'observation de la déviation du plan de polarisation consistait alors simplement à tourner légèrement le Savart de manière à supprimer les bandes de polarisation le long du fil central ou, plus exactement, à l'intersection de ce fil et de la bande centrale. Il est évident que ce déplacement du Savart, qui n'a pas atteint 3° , était trop faible pour modifier la suppression des bandes dues à la polarisation atmosphérique. Nous aurions pu nous en assurer visuellement ; en tout cas les photographies faites ensuite prouvent qu'il en était bien ainsi. Pendant la mesure, la Lune était maintenue entre les fils verticaux au moyen de la manette.

Nous avons ensuite placé l'appareil photographique, tandis qu'un aide déplaçait un contrepoids destiné à l'équilibre et visible sur la photographie de l'instrument (voir *Bulletin de la Société astronomique*, 1909). Nous avons fait quatre photographies, dont l'une à très longue pose, en changeant à chaque fois, au moyen du viseur de la lunette, la position de la Lune par rapport à la plage des bandes de polarisation.

Les photographies obtenues ont été développées le lendemain même de l'éclipse dans d'assez mauvaises conditions en raison de la chaleur. Il n'est pas douteux que les résultats eussent été encore meilleurs en employant un autre révélateur que le Cristallo, qui est très dur et qui voile les plaques par la chaleur. Nous avons un peu remédié à cet inconvénient par l'adjonction de glace dans les bains.

Néanmoins, les photographies sont bonnes et montrent toutes les bandes de polarisation bien marquées et nettes. Seul, le dernier cliché, posé pendant 50 secondes, est très surexposé et flou en raison du déplacement de l'appareil. Nous étions obligés, en effet, de ramener, au moyen de la manette, la Lune dans la position voulue, et cela en raison du vent et de la poussière qui nuisaient à la bonne marche des mouvements d'horlogerie. Tous les temps de pose

étaient d'ailleurs trop grands et nous aurions pu avec avantage les diminuer et faire de plus nombreux clichés ; mais, dans l'ignorance où nous étions de l'éclat qu'aurait la couronne, nous avons cherché, avant tout, à obtenir une impression photographique sûre.

Les trois premiers clichés sont reproduits dans l'article du *Bulletin de la Société astronomique*. Les reproductions sont plus nettes que dans les héliogravures parues dans le Rapport sur l'observation de l'éclipse. Pourtant les bandes sont naturellement bien moins nombreuses et bien moins marquées dans ces reproductions que sur les clichés originaux. On sait, en effet, combien la gravure perd de détails et quelles difficultés il y a à obtenir une reproduction, même grossière, des clichés scientifiques.

La photographie polariscopique de la couronne intérieure a été obtenue avec une plaque antihalo de Lumière retournée, la sous-couche rouge fonctionnant comme écran pour diminuer l'intensité de la lumière. Nous ne pouvions, en effet, employer d'autre procédé, notre obturateur ne donnant pas l'instantané. La reproduction montre nettement la plage de bandes sur le côté le plus brillant de la couronne ; sur l'original, on voit aussi très nettement les bandes du côté opposé. De deux côtés, elles sont visibles jusqu'au bord même de la Lune.

La photographie de la couronne extérieure avec les bandes de polarisation, où le disque de la Lune a été mis à dessein au bord du champ, présente une trace de fausse image due à la double réfraction du nicol et impossible à éviter avec des expositions longues.

L'examen des différents clichés permet d'établir les faits suivants :

On ne peut pas distinguer de différences d'intensité dues, par exemple, aux jets coronaux.

Les bandes sont visibles jusqu'à près d'un diamètre et demi du bord du Soleil, c'est-à-dire jusqu'aux extrémités de la couronne extérieure.

La polarisation est maxima à quelques minutes du bord ; elle s'étend sur la couronne intérieure en diminuant d'intensité jusqu'au bord même de la Lune où elle est faible, mais encore nettement visible. Il ne nous a pas semblé que la proportion de lumière polarisée fût maxima à l'extrémité de la couronne extérieure, comme le voudrait la théorie que nous avons étudiée plus haut.

Le plan de polarisation est sensiblement radial. On peut vérifier pourtant grossièrement la légère déviation mesurée d'autre part visuellement et attribuée au champ magnétique du Soleil.

Enfin, une protubérance s'étant trouvée à cheval sur deux bandes ne présente aucune différence d'intensité, ce qui prouve que la lumière des protubérances n'est pas polarisée. Ce fait n'est pas nouveau, pourtant c'est la première fois

qu'on met en évidence la polarisation de la couronne intérieure qu'on croyait jusqu'ici n'être pas polarisée. Il était donc utile de vérifier que les bandes de polarisation de la couronne intérieure s'arrêtent exactement à la limite de la protubérance qu'elles ne traversent pas.

Pour ce qui est de la proportion de lumière polarisée de la couronne, nous n'avions pas de photopolarimètre; nous ne pouvons donc en donner la valeur exacte. Pourtant, on conçoit que le nombre de bandes visibles, leur intensité, l'angle du plan de polarisation pour lequel elles disparaissent, etc., peuvent nous renseigner sur ce point, au moins approximativement. De ces diverses considérations nous avons conclu que la lumière de la couronne devait contenir environ moitié de lumière polarisée, ce qui confirme les chiffres obtenus par M. Landerer et M. Meslin en 1900 et en 1905 et par M. Julius en 1901 avec des photopolarimètres de Cornu.

Cette valeur de la proportion de lumière polarisée confirme la contradiction dont nous avons parlé entre la polarisation de la couronne et la nature de son spectre. Cette contradiction est rendue encore plus évidente et plus certaine par le fait nouveau que nous avons démontré, à savoir que la couronne intérieure elle-même est sensiblement polarisée.

En effet, le spectre de la couronne intérieure ne contient sûrement pas les raies noires de Fraunhofer.

Ces raies n'ont été vues, et encore très faiblement, que sur la couronne extérieure; elles sont dues, d'ailleurs, en partie, à la lumière de l'atmosphère terrestre qui peut devenir une source d'erreur importante si le ciel est brumeux.

Il y a donc là une première contradiction. La polarisation semble indiquer, en effet, que la lumière de la couronne moyenne et intérieure se compose, en grande partie, de lumière solaire réfléchie; cette lumière devrait donc donner dans le spectre coronal les raies de Fraunhofer très marquées.

De plus, Schuster et Deslandres ont observé que le maximum d'intensité du spectre coronal était situé plus près du rouge que dans le spectre solaire, et même que cette différence était d'autant plus grande que le point considéré était plus éloigné du Soleil : c'est même là le principe d'une méthode proposée par M. Deslandres pour voir la couronne en plein jour. Il y a là une seconde contradiction. En effet, d'après la théorie de Rayleigh, les particules diffusent davantage la lumière de courte longueur d'onde. Si la lumière coronale est due surtout à de la lumière réfléchie, comme semble l'indiquer sa polarisation, le maximum d'intensité du spectre devrait être rejeté du côté du violet, et même d'autant plus qu'on s'éloigne davantage du Soleil, puisque la proportion de

lumière polarisée augmente dans ce sens, comme nous l'avons vu théoriquement.

La théorie de Rayleigh n'est pas une théorie sans base expérimentale. Outre qu'elle explique les phénomènes de coloration de l'atmosphère, elle a été vérifiée expérimentalement par Wood en 1901. Wood ⁽¹⁾ a observé le spectre d'une source de lumière intense réfléchi sur une flamme et il a trouvé que les particules en suspension dans la flamme, et qui diffusaient la lumière, diffusaient presque uniquement les rayons bleus et violets.

Il est vrai que la position du maximum d'intensité du spectre de la couronne observé par Schuster et Deslandres est elle-même en contradiction avec les observations d'Abbot, d'après lesquelles la radiation calorifique de la couronne serait très faible. On sait que cette question de la valeur de la radiation calorifique de la couronne est loin d'être tirée au clair, et l'on peut dire que la position du maximum d'intensité du spectre coronal n'est pas plus sûrement connue.

Si l'observation d'Abbot est exacte, elle s'accorderait bien au contraire avec la théorie de Rayleigh.

Il existe donc une série de contradictions entre la polarisation de la lumière de la couronne intérieure et l'apparence continue de son spectre, l'absence de raies de Fraunhofer et la position du maximum d'intensité.

Le spectre de la couronne contient, en dehors du spectre solaire réfléchi, un spectre de lignes brillantes et un spectre continu. Pour lever les contradictions que nous venons de signaler, on peut d'abord supposer que la polarisation inexplicable de la couronne est due à la lumière de l'un ou l'autre de ces deux derniers spectres. Il est peu probable, *a priori*, que la lumière des gaz incandescents de la couronne soit polarisée. Pourtant il pourrait se faire qu'une action magnétique ou électrique produisit cet effet particulier.

Wood, en 1900 ⁽²⁾, observa visuellement le spectre coronal avec un polariscope de Savart. Les bandes, très marquées sur le fond continu, étaient interrompues sur les lignes brillantes : la lumière des gaz ne semblait donc pas polarisée.

Nous avons aussi envisagé cette question pendant l'éclipse de 1905, comme nous le verrons plus loin. En tout cas, la lumière des gaz de la couronne est très faible, comparée à la lumière qui produit le spectre continu. Les raies

⁽¹⁾ *Astrophysical Journal*, t. XIII, 1901, p. 68.

⁽²⁾ Voir SCHEINER, *Populäre Astrophysik*, p. 293.

brillantes se détachent en effet très peu sur le fond continu malgré l'étalement de celui-ci. La polarisation du spectre de lignes, même si elle existait, n'expliquerait donc pas la polarisation de la lumière de la couronne intérieure.

Il serait plus intéressant de découvrir si la lumière du spectre continu lui-même n'est pas polarisée. Il est vrai qu'un pareil phénomène n'aurait jamais été observé à la surface de la Terre. La lumière émise par les particules incandescentes des flammes n'est pas polarisée, mais il est possible que les particules de la couronne, maintenues à peu près immobiles par la combinaison de la gravitation et de la pression de radiation de Maxwell-Bartoli, émettent de la lumière polarisée dans la direction où agissent ces forces, tandis que dans les flammes, où se produisent des mouvements violents, les particules ne peuvent émettre que de la lumière neutre. Ce n'est là qu'une suggestion, mais qui est possible puisqu'on n'a jamais observé de particules placées dans les conditions de celles de la couronne.

Si ce fait singulier était exact, on pourrait peut-être le mettre en évidence en examinant avec un polariscope de Savart les larges raies H et K, ou plutôt leur place, si elles ne sont pas visibles. Le fond de ces raies, ou l'emplacement où on devrait les voir, ne doit pas être polarisé si le spectre continu ne l'est pas. Les bandes doivent donc être interrompues sur ces régions du spectre comme sur les lignes brillantes.

Une seconde expérience, qui sera très intéressante à faire aux prochaines éclipses, sera de mesurer la proportion de lumière polarisée de la couronne pour les différentes parties du spectre. Cette expérience sera facile; il suffira en effet de faire deux mesures avec le photopolarimètre de Cornu, comme l'a fait Landerer, par exemple, mais en plaçant devant le photopolarimètre successivement un verre rouge et un verre bleu.

Si la polarisation est plus grande pour les rayons bleus, cela pourra être considéré comme un appui à la théorie qui veut que la lumière coronale soit surtout due à la diffusion de la lumière solaire.

Il en est de même pour la lumière atmosphérique. Piltchikoff ⁽¹⁾ a observé en effet que la polarisation de la lumière était plus grande pour les rayons bleus que pour les rayons rouges, et cette observation peut être considérée comme un appui à la théorie de Rayleigh et une contradiction à la théorie de la fluorescence de Lallemand, qui avait cours à cette époque.

Si l'on trouve, au contraire, que la polarisation est plus grande pour les rayons rouges, cela prouvera que c'est le spectre continu lui-même qui est pola-

(1) *Comptes rendus*, t. CXV, 1892, p. 555.

risé, puisque le maximum d'intensité du spectre coronal est déplacé du côté du rouge, tandis que celui du spectre réfléchi est déplacé du côté du violet.

Les contradictions que nous avons signalées n'existeraient plus si l'on admettait la théorie de la couronne solaire présentée en 1908 par *Wood* ⁽¹⁾ et qui avait déjà été indiquée par *Wiedemann* et *Schmidt* ⁽²⁾ en 1896. D'après cette théorie, la lumière de la couronne serait due à des vapeurs métalliques rendues fluorescentes par le rayonnement intense du Soleil. Les vapeurs métalliques donnent dans ces conditions des spectres de bandes. L'apparence continue du fond du spectre coronal s'expliquerait par la superposition de ces différents spectres de bandes observés avec une dispersion insuffisante. Dans cette hypothèse, la ligne verte du coronium serait, en réalité, une ligne de fluorescence d'une substance connue. Cette théorie trouve une confirmation dans une observation de *Lockyer*, en 1882, qui a trouvé que le fond du spectre coronal semblait « formé de spectres de bandes superposés ».

Or, *Wood* ⁽³⁾ a montré que la lumière fluorescente des vapeurs métalliques est fortement polarisée, et précisément dans la même proportion que la lumière de la couronne. La polarisation de la couronne intérieure que nous avons découverte n'impliquerait donc plus la réflexion de la lumière solaire sur des particules; l'absence des raies de Fraunhofer cesserait donc d'être inexplicable. De plus, on comprendrait facilement ainsi l'absence de chaleur rayonnante, si elle est confirmée, car les spectres de fluorescence s'étendent peu du côté des rayons les moins réfrangibles.

Nos observations peuvent donc être considérées comme un appui à la théorie nouvelle de Wiedemann, Schmidt et Wood. Pourtant, cette théorie ne nous semble pas prouvée pour cela, et restera sans doute très hypothétique tant qu'on n'aura pas sûrement résolu en bandes le fond du spectre coronal, qui paraît jusqu'ici purement continu.

Observations sur la spectropolarisation de la couronne. — La spectropolarisation, c'est-à-dire l'étude de la polarisation des diverses radiations d'une source complexe, est un terrain peu exploré (du moins si l'on met de côté les recherches se rapportant au phénomène de Zeeman). En ce qui concerne la couronne solaire, cette méthode nous a semblé pourtant propre à résoudre

(1) *Astrophysical Journal*, t. XXVIII, 1908, p. 75.

(2) *Astrophysical Journal*, t. III, 1896, p. 207.

(3) *Ibid.*, t. XXVIII, 1908, p. 75.

quelques-uns des problèmes qui se posent encore sur la nature de ce phénomène.

Lorsqu'on observe, en effet, certaines radiations qui semblent venir d'un point bien déterminé du voisinage du Soleil, il est difficile de savoir si ces radiations ont pris naissance effectivement en ce point, ou si elles n'ont pas été réfléchies ou diffusées dans l'atmosphère de la Terre ou dans celle du Soleil. Or, la direction du plan de polarisation de ces radiations peut nous renseigner sur leur origine. Par exemple, la lumière solaire réfléchie sur les particules de la couronne est polarisée radialement; on peut donc la distinguer à ce signe de la lumière diffusée de l'atmosphère terrestre, lumière de même nature, mais polarisée, comme nous l'avons déjà dit, dans une direction uniforme, généralement verticale. De même, les radiations monochromatiques d'origine vraiment coronale ne doivent pas être polarisées, comme nous l'avons vu plus haut; on peut donc ainsi les distinguer des radiations chromosphériques réfléchies dans la couronne.

Nous avons aussi imaginé, à ce propos, une méthode nouvelle permettant de trouver des radiations d'origine coronale. Nous avons vu que la lumière de la couronne qui donne un spectre continu, avec ou sans raies de Fraunhofer, est fortement polarisée. En 1900, *Landerer* ⁽¹⁾ a trouvé 0,52 comme proportion de lumière polarisée, le point visé étant en pleine couronne intérieure; nous avons vu que nos observations ont vérifié ces résultats. Si l'on place un nicol devant la fente du spectroscopie, on supprimera cette lumière polarisée, on affaiblira de moitié la lumière neutre du spectre continu et du spectre de ligne. Soient p la proportion de lumière polarisée de la lumière à spectre continu, E son intensité, E' l'intensité de la lumière polarisée, e l'éclat du spectre de ligne; on a

$$E = E' + E(1 - p).$$

Le rapport $\frac{e}{E}$ du spectre de ligne au spectre continu deviendra donc avec le nicol

$$\frac{1}{1-p} \frac{e}{E};$$

en prenant $p = 0,52$, on voit que ce rapport est doublé. Les raies brillantes seront donc deux fois plus visibles avec le nicol, et l'on peut ainsi espérer trouver des radiations nouvelles d'origine coronale.

Nous avons donc placé un nicol devant la fente du spectroscopie et fait une photographie du spectre visuel dans ces conditions; mais, en raison des très

(1) *Comptes rendus*, t. CXXX, 1900, p. 1524.

petites dimensions de notre spectroscopie et de la dispersion insuffisante que nous avons employée parce que nous cherchions surtout à photographier les raies noires, nous n'avons pas obtenu d'autre radiation coronale que celles que l'on connaissait déjà.

Nous avons placé le nicol seulement devant la moitié de la fente, de manière à n'éteindre que d'un côté du Soleil la lumière polarisée radialement. Nous espérons ainsi avoir des comparaisons intéressantes entre le spectre naturel et le spectre polarisé.

Nous devons reconnaître que, pour cette étude, la méthode que nous employions était loin d'être la meilleure. Nous ne nous en sommes servis d'ailleurs que faute d'avoir deux spectroscopes dont un seul aurait été muni d'un nicol, l'autre donnant un spectre naturel de comparaison.

La méthode employée par M. *Newall* à la même éclipse, et qui consiste à dédoubler le spectre avec un prisme biréfringent, est de beaucoup préférable et donnera sans doute des résultats dans l'avenir. En fait, notre observation n'a pas fourni de résultats nouveaux. On observe que les spectres des deux côtés de la couronne diffèrent bien d'intensité, bien qu'on eût compensé, par des ouvertures différentes des deux parties de la fente, l'effet de l'absorption du nicol. Ce fait confirme les observations polariscopiques sur l'intensité de la lumière polarisée. Mais il s'est trouvé, ce qu'on pouvait prévoir, que les deux parties de la couronne traversées par la fente de part et d'autre du Soleil n'avaient pas la même intensité ni la même composition. Une protubérance se trouvait située, en effet, du côté du nicol et a donné les raies ordinaires des protubérances très marquées. On trouvera, dans le Rapport de l'observation de l'éclipse, l'étude de ces raies au point de vue purement spectroscopique.

Nous croyons que cette nouvelle méthode aurait intérêt à être reprise avec des instruments plus puissants ; elle permettra seule de photographier les radiations monochromatiques les plus faibles de la couronne.

CHAPITRE IV.

LES COMÈTES.

Historique. — Dans l'étude des comètes se pose la question suivante ⁽¹⁾ :

⁽¹⁾ Voyez *Spectroscopie astronomique*, p. 326.

Le spectre continu du noyau ou de la queue est-il dû en plus ou moins grande partie à de la lumière propre ou à de la lumière réfléchié ?

Cette étude peut être abordée par la Spectroscopie, la Spectrophotométrie et la Spectropolariscopie.

Le spectroscopie nous apprend que les photographies d'*Huggins* en 1881 montrent les lignes noires de Fraunhofer, et que, par suite, une partie au moins de la lumière des comètes vient du Soleil par réflexion. Pourtant, d'après les observations d'*Huggins* en 1882, on peut conclure que les comètes présentent aussi parfois un spectre continu sans raies de Fraunhofer, et qu'on ne peut expliquer ce fait ni par le peu d'intensité du spectre, ni par la largeur de la fente. Les observations suivantes ont confirmé ces faits ; il semble donc qu'il y ait dans les comètes, comme dans la couronne solaire, des particules qui diffusent la lumière et qui sont, en même temps, incandescentes par elles-mêmes.

Les observations polariscopiques semblent confirmer la première observation d'*Huggins*.

Arago, *Prazmowski* et bien d'autres observateurs ont trouvé que la lumière des comètes est partiellement polarisée.

Parfois on n'a pas trouvé de trace de polarisation, mais cela pouvait s'expliquer par l'angle trop faible des rayons incidents et réfléchis. Ainsi *Prazmowski* ⁽¹⁾ trouva une forte polarisation pour la comète Donati, la valeur de cet angle étant 90°. Il ne vit aucune trace de polarisation en 1861, l'angle étant à peu près nul, et en 1881, l'angle étant de 60°, il trouva une polarisation sensible, mais moins forte que pour la comète de Donati.

Mais il y a, dans ces observations, de nombreuses contradictions tenant tout d'abord à ce qu'elles se rapportent tantôt à la queue et tantôt au noyau.

Arago dit nettement que la queue de la comète de 1819 était polarisée ; de même *Secchi* ⁽²⁾, observant les comètes de 1861 et de 1868, trouva que la queue était fortement polarisée, tandis que le noyau ne l'était pas ou qu'il l'était d'une façon à peine sensible.

Au contraire, les observations de *Chacornac*, *Ronzoni*, *Govi*, *Poëy*, *Liais* ⁽³⁾ s'accordent pour montrer que la lumière de la comète Donati était polarisée dans le noyau ou dans les portions de la queue voisines du noyau. *Tacchini* et *Pisati* observèrent la comète Coggia en 1874 et trouvèrent que la lumière du noyau était polarisée, mais que celle de la queue l'était également. Enfin *Fiévez*, en 1881, constata que la polarisation du noyau était très

(1) *Comptes rendus*, t. XCIII, 1881, p. 262 ; t. LXVI, 1868, p. 1119.

(2) *Comptes rendus*, t. LIII, 1861, p. 317.

(3) *Comptes rendus*, t. XLVIII, 1859, p. 624, 728, etc.

marquée, tandis que celle de la chevelure était insensible. *Wright* ⁽¹⁾ mesura la proportion de lumière polarisée pour la même comète; cette proportion était assez élevée et changea avec l'angle de réflexion, passant de 23 à 14 pour 100.

Liais avait déjà mesuré les proportions de lumière polarisée pour la comète de Donati. Il est curieux de remarquer à ce sujet que l'instrument dont se servait *Liais* ⁽²⁾ n'était autre chose qu'un photopolarimètre de Cornu, où le nicol aurait simplement été remplacé par une tourmaline. Cet instrument servait donc déjà dès 1858 à mesurer les proportions de lumière polarisée.

Secchi, en 1874, fit sur la comète Coggia la première et, à notre connaissance, l'unique expérience de spectropolarisation. Regardant le spectre au travers d'un nicol, il vit la partie continue s'affaiblir, tandis que les bandes conservaient leur vivacité.

Campbell ⁽³⁾ a observé en 1908 une polarisation faible dans la queue, près de la tête et dans la chevelure. La lumière du noyau n'était pas polarisée.

On voit que beaucoup d'observateurs ont trouvé que la lumière de la queue était fortement polarisée. Or, on sait ⁽⁴⁾ que le spectre continu y est généralement très faible et que, pour certaine comète, la queue n'avait probablement qu'un spectre de bandes. On a trouvé aussi de la lumière polarisée dans le noyau, alors que ce noyau présentait surtout de la lumière monochromatique.

Devons-nous croire que cette contradiction vient de ce que la lumière émise par les gaz incandescents de la comète était, dans ce cas, polarisée rectilignement? Il est vrai qu'un pareil phénomène n'est pas impossible, comme cela résulte des expériences de *Egoroff* et *Georgiewski* ⁽⁵⁾ sur la lumière d'un tube de Geissler soumis à un champ magnétique. Mais il est difficile, d'après notre mesure du champ magnétique solaire, d'admettre un champ suffisant pour produire un pareil effet. On pourrait peut-être expliquer cette polarisation, si elle était confirmée, par un champ électrique. On voit donc l'intérêt qu'il y aura, lorsque apparaîtra une belle comète, à étudier la polarisation des différentes parties de son spectre.

La dernière comète présentait la particularité d'avoir un spectre presque exclusivement formé de bandes sur toute la queue. *M. de la Baume-Pluvinel* n'y a pas vu de trace de spectre continu. C'était donc là une occasion de vérifier

(1) *American Journal*, 3^e série, t. XXII, p. 142.

(2) *Comptes rendus*. t. XLVIII, 1859, p. 624.

(3) *Astrophysical Journal*, t. XXVIII, 1908, p. 229.

(4) Voir *Spectroscopie astronomique*.

(5) *Comptes rendus*, t. CXXIV, 1897, p. 748 et 1242; t. CXXV, 1897, p. 16.

si de la lumière donnant un spectre de bande pouvait être polarisée. Nous avons préparé dans ce but un polariscope à double image et à teinte sensible. Malheureusement nous n'avions pas, à cette époque, la disposition d'un instrument équatorial.

Travaux personnels. — Le fait que le spectre de la queue des comètes est parfois exclusivement un spectre de bandes, sans traces de spectre continu, nous a semblé une confirmation de la théorie électrostatique et une contradiction de la théorie de la pression de Maxwell-Bartoli généralement admise à ce moment. Nous n'entrons pas dans le détail de cette théorie que nous avons exposée dans un article intitulé *Les comètes et les théories ionistiques* ⁽¹⁾. Cette théorie, qui suppose que les comètes possèdent une charge électrique non nulle, a reçu une confirmation dans les travaux de M. Backlund sur le mouvement de la comète d'Encke, et a été reprise récemment par M. Chrétien ⁽²⁾ qui en a tiré l'explication des mouvements des particules des queues cométaires. En effet, le mouvement des particules électrisées dans un champ magnétique crée une force perpendiculaire à la direction de la vitesse et à celle du champ.

Maintenant que nous avons calculé la grandeur probable du champ magnétique solaire, d'après les résultats de Hale, il est intéressant de nous rendre compte si le champ solaire peut effectivement avoir un effet sensible sur les particules cométaires, comme l'a avancé M. Chrétien, ou sur le mouvement du noyau, comme le pense M. Backlund.

Nous avons vu que le champ solaire décroît comme le cube de la distance au Soleil. Supposons que la comète soit à la même distance du Soleil que la Terre, elle sera soumise à un champ magnétique

$$\varphi = \frac{1}{D^3} \Phi = 10^{-7} \Phi,$$

D étant la distance du Soleil à la Terre.

D'après notre évaluation, et d'après la remarque de M. Bosler, Φ doit valoir environ 10 unités C. G. S. La vitesse de la comète est facile à évaluer; la formule de Laplace nous donne donc la valeur de la force due au déplacement d'une masse électrique q

$$f = \varphi q v;$$

(1) *Bulletin de la Société astronomique*, 1907, p. 325.

(2) *Ibid.*, 1909, p. 283.

en supposant la vitesse perpendiculaire au champ,

$$f = 10^{-7} \Phi q \times 3.10^6 = 3q,$$

f est donc de l'ordre de q .

La force due à l'attraction du Soleil vaut environ, à la distance de la Terre,

$$f' = \frac{1}{2} m.$$

Le rapport de la force due au déplacement électrisé à la force de gravitation est donc de l'ordre de $\frac{q}{m}$.

Il est donc exact de dire, comme l'a fait M. Chrétien, « qu'on n'a pas besoin de supposer que la particule est un ion pur (pour lequel on aurait $\frac{q}{m} = 10000$ environ) pour conclure qu'à une certaine distance du Soleil la force électromagnétique peut être du même ordre de grandeur que celle de la gravitation ». Nous voyons qu'il suffit que la charge électrostatique soit 10000 fois plus faible que la masse. Nos conclusions sur la valeur du champ magnétique solaire confirment donc la possibilité de l'effet prévu par MM. Chrétien et Backlund.



CHAPITRE V.

LA LUNE ET LES PLANÈTES.



Historique. — *Arago* ⁽¹⁾ a constaté que la lumière de la Lune est polarisée quand elle est en croissant, et que la polarisation est surtout marquée sur les mers. *Secchi* ⁽²⁾ remarqua aussi la différence énorme de polarisation entre les mers et les montagnes, où la polarisation est presque nulle; il observa aussi que la proportion de lumière polarisée est presque égale sur toute la face éclairée. *Arago* remarqua que le maximum de polarisation de l'ensemble de la lumière de la Lune avait lieu vers la quadrature; il avança que c'est ce qu'on devait attendre si la surface de la Lune est recouverte d'une atmosphère. On croyait en effet, à cette époque, que la polarisation atmosphérique était produite par la

⁽¹⁾ *Astronomie populaire*, t. II, p. 463.

⁽²⁾ *Monthly Notices*, t. XIX, 1859, p. 289; *Astronomische Nachrichten*, t. LII, 1860, p. 93.

réflexion de la lumière solaire sur des couches d'air et, comme la polarisation est maxima à 90° du Soleil, on en concluait que l'angle de polarisation des gaz était de 45° . Malgré cette erreur, Arago avait donc eu le premier l'idée de chercher l'indice de réfraction du sol lunaire par la mesure de son angle de polarisation.

De 1872 à 1875, *Lord Rosse* ⁽¹⁾ chercha l'élongation pour laquelle la polarisation d'un point bien déterminé de la Lune passait par un maximum. Il examina, entre autres, la mer des Crises et trouva que l'élongation de polarisation maxima était de 86° .

Ces recherches furent reprises par *Landerer* ⁽²⁾. Cet observateur ne semble pas avoir eu connaissance des travaux de Lord Rosse et n'a pas examiné un point déterminé de la Lune. Il chercha l'angle de polarisation maxima de la surface lunaire en mesurant la proportion de lumière polarisée venant du centre du croissant à différents âges de la Lune. Il trouva $33^\circ 17'$ pour valeur de cet angle compté à partir de la surface. Il détermina ensuite ⁽³⁾ les angles de polarisation de certaines roches et aussi celui de la glace. Il conclut de ses recherches que la surface de la Lune était formée d'une certaine espèce de roche et n'était certainement pas recouverte de glace.

Arago ⁽⁴⁾, lors de l'éclipse totale de Lune du 31 mai 1844, attira l'attention sur « les traces manifestes de polarisation qu'on apercevait en analysant, à l'aide d'un polariscope, la lumière rougeâtre répandue sur le disque lunaire au moment même de la conjonction ». Ce fait fut vérifié, paraît-il, par tous les astronomes présents. *Zantedeschi* ⁽⁵⁾ fit une observation identique pendant l'éclipse du 24 novembre 1844. *Freeman* ⁽⁶⁾, *Poëy* firent des observations analogues.

Secchi ⁽⁷⁾ observa que la lumière de Jupiter, Saturne, Mars n'est pas polarisée. *Landerer* ⁽⁸⁾ montra que la lumière de Vénus n'est pas polarisée. Pourtant *Lord Rosse* ⁽⁹⁾, dans une série d'observations comprises entre le 12 mars et le 6 avril 1872, trouvait que la lumière de Vénus était polarisée dans la proportion de 0,1 environ.

(1) *Proceedings of the Royal Dublin Society*, t. I, 1878, p. 19.

(2) *Comptes rendus*, t. CIX, 1889, p. 360.

(3) *Ibid.*, t. CXI, 1890, p. 210.

(4) *Comptes rendus*, t. XVIII, 1844, p. 1119; *OEuvres*, t. X, p. 570.

(5) *Ibid.*, t. XIX, 1844, p. 1318.

(6) *Nature*, t. XV, 1877, p. 398.

(7) *Loc. cit.*

(8) *Comptes rendus*, t. CXIV, 1892, p. 1524.

(9) *Loc. cit.*

Pickering ⁽¹⁾ observa, le 4 juin 1894, que la région noire située près de la calotte polaire de la planète Mars était polarisée; il en conclut que cette tache était une surface liquide réfléchissant la lumière de l'atmosphère martienne.

Enfin *Wright* a trouvé que la lumière zodiacale était sensiblement polarisée.

TRAVAUX PERSONNELS. — *Polarisation de Mercure*. — Nous avons montré ⁽²⁾ que la lumière de Mercure n'est pas polarisée. Pour cela nous avons d'abord employé un polariscope du genre de celui d'Arago, c'est-à-dire formé d'un petit prisme biréfringent, ou prisme de Wollaston, et d'une plaque parallèle en quartz rouge. Le prisme de Wollaston dédoublait les images en donnant un angle de $47'$; placé devant l'oculaire qui grossissait 600 fois, il écartait donc les images de $5''$ environ. Le diamètre de Mercure en quadrature vaut environ $7''$ et le demi-diamètre $3'',5$; les images étaient donc écartées de manière à avoir une partie superposée ou, au contraire, à être complètement séparées.

Dans ce cas, l'atmosphère polarisée donne une teinte blanche malgré le polariscope et la polarisation de Mercure se serait traduite par des différences de teinte des deux images. Nous avons employé aussi des mica donnant la teinte sensible et nous n'avons pu constater aucune différence entre les deux images.

On aurait pu pourtant objecter que Mercure est toujours assez près de l'horizon; il en résulte que la réfraction lui donne l'apparence d'un petit spectre, le bord supérieur étant violet, le bord inférieur rouge. Il en résulte que les deux images dédoublées ne sont pas absolument blanches; on observe qu'elles ont des teintes identiques, mais non qu'elles sont absolument blanches; on est donc privé du plus grand avantage du polariscope d'Arago.

Pour échapper à cette critique, nous avons cherché à voir la polarisation de Mercure avec un polariscope de Savart. Il faut alors avoir des bandes extrêmement serrées pour qu'on en ait au moins deux ou trois sur le diamètre de la planète, sans quoi l'observation ne peut donner aucun résultat. Nous sommes arrivé aisément, en plaçant le polariscope devant l'oculaire et en prenant des quartz assez épais, à avoir assez de bandes sur le diamètre de la planète.

Mais, dans ce cas, à moins de faire l'observation tard et quand, par suite, les images sont moins bonnes, on est gêné par la polarisation atmosphérique.

La lumière atmosphérique, qui est polarisée, se superpose à celle de l'astre. Si la proportion de lumière polarisée est la même sur la planète et sur le ciel, cela prouve que la lumière de l'astre est polarisée dans la même proportion que

⁽¹⁾ *Astronomy and Astrophysics*, t. XIII, 1893, p. 553.

⁽²⁾ *Comptes rendus*, t. CXLIII, 1906, p. 1125.

celle de l'atmosphère. Si l'astre est moins polarisé que l'atmosphère, la proportion de lumière polarisée sera plus faible sur l'astre ; c'est ce qui explique qu'en regardant la Lune ou Mercure avec un polariscope de Savart, on voit les bandes sur le ciel et on ne les voit pas sur l'astre, bien que sa lumière soit polarisée. On doit donc supprimer autant que possible la lumière polarisée atmosphérique et pour cela se servir de verres rouges, etc.

Nous n'avons pas pu observer non plus, par ce procédé, de polarisation sur Mercure.

On serait donc tenté de conclure de cette absence de polarisation que la planète Mercure est entourée de nuages couvrant complètement la surface et qui diffusent la lumière sans la polariser. Pourtant il y a là une contradiction, car Mercure a un albedo très faible (0,17) précisément égal à celui de la Lune. On devrait donc ranger Mercure, d'après cet albedo, dans la catégorie des planètes sans atmosphère, et sa lumière devrait être polarisée comme celle de la Lune.

Nous avons fait remarquer que cette contradiction est peut-être seulement apparente. La polarisation de la Lune est très marquée sur les mers, il est vrai, mais est très faible sur les autres régions du disque. Il suffit pour s'en assurer d'observer, avec un polariscope de Savart placé devant l'oculaire, la surface de la Lune. Les bandes sont intenses sur les mers et sont très peu marquées sur les autres parties. L'absence de polarisation de Mercure peut être due, par conséquent, simplement à la nature de son sol, et la première chose à faire était de voir si la Lune, observée dans les mêmes conditions que Mercure, offre une polarisation sensible dans son ensemble, ou si la polarisation est sensiblement confinée dans les mers.

Observations sur la Lune. — Nous avons observé la Lune du 30 octobre 1908 au 1^{er} novembre, c'est-à-dire de la nouvelle Lune au premier quartier, en nous plaçant dans des conditions analogues à celles de l'observation de Mercure, c'est-à-dire en observant la Lune à l'œil nu, car elle sous-tend alors à peu près le même angle que Mercure dans la lunette. Le résultat de toutes ces observations, que nous ne pouvons examiner en détail, est que, même si Mercure présente la même configuration que la Lune, on ne peut guère espérer en observer la polarisation. La polarisation de la Lune n'est facilement visible que parce que les mers, qui sont fortement polarisées, sont assez larges, mais son ensemble ne présente pas une polarisation très marquée. En tout cas, si Mercure a la même configuration que les parties blanches de la Lune, il n'y a rien d'étonnant à ce qu'on ne puisse observer sa polarisation, et cela ne peut pas être considéré comme une preuve que la planète est entourée d'une atmosphère nuageuse.

On peut dire que presque tout est encore à faire dans l'étude de la polarisation de la Lune si l'on veut pouvoir en tirer des résultats un peu sûrs.

Le travail de M. Landerer, à notre avis, est loin d'avoir résolu la question. Il est aisé de se rendre compte, en effet, que si l'on mesure la proportion de lumière polarisée à différents âges de la Lune, on peut opérer de deux façons :

1° On observe, comme l'a fait M. *Landerer*, le centre *c* du croissant. Mais

Fig. 9.



alors ce centre correspond à des régions variables de la surface, c'est-à-dire tantôt à une partie donnant une forte polarisation, tantôt à une partie moins polarisée.

La variation de la proportion de lumière polarisée ne nous apprend donc rien de certain sur la valeur de l'angle de polarisation maxima.

2° On observe, comme l'a fait *Lord Rosse*, une région bien déterminée du disque lunaire, par exemple un certain point d'une mer, et l'on en détermine la proportion de lumière polarisée à différents âges de la Lune. Mais alors il faut remarquer que l'angle d'incidence des rayons du Soleil sur la surface diffusante varie seul, l'angle de diffusion étant constant. Comment varie la proportion de lumière diffusée dans ce cas ? Nous verrons que cette question n'a jamais été étudiée et que nous ne disposons, par conséquent, d'aucune donnée physique pour nous rendre compte de la nature de la surface.

Si l'on calcule les angles donnés par l'observation de Lord Rosse, on trouve que le maximum de polarisation était atteint pour un angle d'incidence de 37° et un angle de réflexion de 57° . Dans l'observation de Landerer, le maximum était atteint pour des valeurs de l'angle d'incidence et de réflexion de 57° .

Sur la polarisation de la Lune éclipcée. — Nous avons vu que de nombreux observateurs ont trouvé que la lumière de la Lune éclipcée était polarisée.

L'autorité d'Arago donne une importance particulière à ces observations qui semblent pourtant bien inexplicables.

Il faudrait tout d'abord les vérifier par une méthode sûre et sensible. A l'occasion de l'éclipse totale de Lune qui devait avoir lieu le 3 juin dernier, nous avons préparé les appareils nécessaires pour faire cette observation. Nous devions nous servir de la lunette polariscopique employée en 1905 pour l'éclipse de Soleil. Cette lunette avait l'avantage d'être très lumineuse et de donner des bandes assez serrées pour qu'on puisse en avoir plusieurs sur la largeur d'une mer. Or, on sait que les mers sont seules fortement polarisées; nous étions donc dans de bien meilleures conditions qu'Arago qui observait l'ensemble de la polarisation de la Lune. Nous disposions, de plus, d'oculaires de différentes puissances et de polariscopes variés, du type Savart et du type Arago, pour examiner la question de toutes les façons possibles. Nous pouvions aussi espérer photographier la Lune et les bandes de polarisation, si elles existaient, avec le même appareil photographique qui nous avait servi pour photographier les bandes sur la couronne solaire.

Pour la même éclipse, nous avons monté et réglé un spectroscopie peu dispersif, alimenté par une lentille collectrice et un héliostat, pour examiner le spectre de la Lune et vérifier la possibilité des observations de raies telluriques, observations qui nous paraissaient très douteuses. Le spectroscopie comportait une petite chambre photographique et nous avons essayé différentes espèces de plaques panchromatiques pour photographier le spectre de la Lune éclipmée et le comparer au spectre lunaire ordinaire. Avec les plaques Wratten et la durée d'une heure de l'éclipse, on pouvait compter avoir des résultats intéressants, au moins en ce qui concerne l'intensité relative des différentes parties du spectre, sinon pour la présence des lignes telluriques.

Malheureusement tous ces préparatifs ont été rendus inutiles par l'orage qui a éclaté, comme on sait, au moment de l'éclipse.

Nous n'avons donc pu vérifier la réalité de la polarisation de la Lune éclipmée et il faudra attendre longtemps avant de pouvoir le faire. Nous allons donc examiner auparavant la possibilité théorique de cette polarisation.

Il semble impossible que la lumière du centre de la Lune soit polarisée au moment de la conjonction, puisqu'à cet instant les conditions physiques sont les mêmes dans toutes les directions autour du rayon visuel. Quant aux bords de la Lune, on ne peut pas admettre d'abord que la lumière ait été polarisée par réfraction dans l'atmosphère de la Terre comme on le croyait autrefois.

La polarisation par réfraction dans des couches gazeuses était autrefois couramment admise.

Verdet ⁽¹⁾ écrit, à propos de la polarisation par émission que, « si la lumière émise par les gaz incandescents n'est pas polarisée, cela s'explique par la faiblesse de la réfraction quand un rayon passe d'un gaz dans un autre ou même d'un gaz dans le vide ».

Brewster ⁽²⁾ écrit que théoriquement « la lumière des corps célestes éprouve une légère polarisation par la réfraction de l'atmosphère ». *Poëy* ⁽³⁾ et bien d'autres ont parlé de cette polarisation par réfraction dans l'atmosphère terrestre.

Dans le cas de l'atmosphère solaire, nous avons écrit ⁽⁴⁾ que la lumière des protubérances devrait être polarisée par réfraction si, comme le veut la théorie de Julius, leur lumière provenait de la lumière à spectre continu de la photosphère, ayant subi des réfractions successives dans l'atmosphère du Soleil.

Mais *M. Fabry* ⁽⁵⁾ a objecté que dans les gaz « il ne peut y avoir aucune discontinuité, mais seulement variation progressive de l'indice de réfraction ; la propagation de la lumière se fait en ligne courbe, sans aucune brisure ». Or, dans ce cas, il ne peut se produire, théoriquement, de polarisation. *M. Fabry* a fait l'expérience suivante : il superposait deux liquides miscibles d'indice différent et cherchait à observer le faisceau réfléchi par leur surface de séparation ; il n'a pu l'observer. Il n'y a donc pas, dans ce cas, de réflexion accompagnant la réfraction et, par suite, pas de polarisation. Mais il est évident que cette expérience sur des liquides miscibles ne prouve pas que dans les protubérances, où il s'agit de gaz de nature différente entraînés par des courants violents, il n'y ait que des variations progressives de l'indice de réfraction.

M. Bourget ⁽⁶⁾ a aussi examiné la question, mais seulement en se plaçant dans le cas d'un trajet curviligne des rayons, c'est-à-dire d'un indice variant d'une façon absolument continue. Il a rappelé que *M. Boussinesq* ⁽⁷⁾ a montré que dans ce cas il ne peut y avoir, théoriquement, de polarisation.

Ce fait est d'ailleurs évident. En effet, dans le cas d'une réfraction à la surface de deux milieux d'indice différent, la quantité de lumière polarisée ou, plus exactement, la proportion q de l'intensité de la lumière polarisée par réfraction

⁽¹⁾ *Optique physique*, t. II, p. 485.

⁽²⁾ *Comptes rendus*, t. XLVIII, 1859, p. 384.

⁽³⁾ *Comptes rendus*, t. LIII, 1861, p. 124.

⁽⁴⁾ *Comptes rendus*, t. CXLIV, 1907, p. 1147.

⁽⁵⁾ *Comptes rendus*, t. CXLV, 1907, p. 112.

⁽⁶⁾ *Comptes rendus*, t. CXLV, 1907, p. 301.

⁽⁷⁾ *Comptes rendus*, t. CXXIX, 1899, p. 794, 859, 909.

à l'intensité de la lumière qui reste neutre, ne dépend pas de la nature du corps ni de l'incidence, mais seulement de la déviation δ du rayon (¹). On a

$$q = \frac{1}{2} \tan^2 \delta$$

et, si les déviations sont petites :

$$q = \frac{\delta^2}{2}.$$

La proportion de lumière polarisée produite par une série de réfractions successives dans un même plan vaudra donc, avec la même approximation,

$$Q = \frac{1}{2} \Sigma \delta^2 = \frac{\delta_1}{2} \Sigma \delta = \frac{\delta_1}{2} \Delta,$$

en appelant δ_1 une valeur comprise entre la plus grande et la plus petite des déviations, et Δ la déviation totale. Si Δ reste constant et que les réfractions deviennent de plus en plus nombreuses, de telle sorte que la trajectoire brisée devienne curviligne, il est évident que δ_1 et par suite Q tendent vers zéro.

Le fait théorique établi par MM. Fabry et Bourget est donc bien certain ; mais il s'agirait de savoir si, en pratique, l'indice de réfraction varie d'une façon progressive et continue dans un milieu aussi varié et agité que la surface solaire. Cela ne semble pas prouvé par l'expérience de M. Fabry sur les liquides miscibles. Pourtant, nous reconnaissons qu'il peut se faire que dans l'atmosphère solaire, malgré la variété des éléments des couches de gaz et malgré leurs mouvements violents, l'indice de réfraction varie toujours uniformément, et l'on ne peut donc pas tirer de l'absence de polarisation des protubérances la conclusion que la théorie de Julius est inexacte. Nous devons ajouter que la théorie des protubérances de Julius est soumise à des objections plus graves et qui l'ont fait abandonner par le plus grand nombre des astronomes (²).

(¹) En effet, la lumière réfractée se compose d'une quantité de lumière naturelle ayant pour intensité

$$I \propto \frac{\sin 2i \sin 2r}{\sin^2(i+r)}$$

et d'une quantité de lumière polarisée ayant pour intensité

$$\frac{1}{2} \frac{\sin 2i \sin 2r}{\sin^2(i+r) \cos^2(i-r)} = \frac{1}{2} \frac{\sin 2i \sin 2r}{\sin^2(i+r)}$$

ou

$$\frac{1}{2} \frac{\sin 2i \sin 2r}{\sin^2(i+r)} \times \frac{\sin^2(i-r)}{\cos^2(i-r)}.$$

(²) Voir SCHEINER, *Populäre Astrophysik*, p. 426.

En tout cas, l'objection de M. Fabry aura eu l'avantage d'attirer l'attention sur l'inexactitude de l'opinion, émise notamment par Brewster, que la réfraction dans l'atmosphère doit polariser la lumière. Dans ce cas, en effet, il n'est pas douteux que nous ne soyons dans les conditions envisagées par MM. Fabry et Bourget. L'indice varie certainement uniformément et, par suite, il ne peut y avoir de polarisation. D'ailleurs la déviation est si faible que la proportion de lumière polarisée serait insensible, même si cette déviation était brusque. La crainte que l'on avait autrefois que le passage des rayons au travers de l'atmosphère ne fausse les observations de polarisation est donc tout à fait chimérique. Particulièrement, dans le cas qui nous occupe, la lumière de la Lune éclipsée ne peut être polarisée par réfraction dans l'atmosphère terrestre.

Si l'observation d'Arago est confirmée, on doit donc aussi trouver que les bords de la pleine Lune non éclipsée présentent des traces de polarisation. Il s'agirait alors simplement d'une polarisation par diffusion, avec cette particularité que le rayon diffusé revient, dans ce cas, suivant la direction du rayon incident. Un pareil phénomène est-il possible et permet-il d'expliquer les observations de polarisation de la pleine Lune ou de la Lune éclipsée ?

Ce cas particulier de polarisation par diffusion n'a jamais été étudié, du moins sous le rapport qui nous intéresse, c'est-à-dire en ce qui concerne la proportion de lumière polarisée et sa variation avec l'angle d'incidence et avec la nature de la surface diffusante.

En 1852, *de la Provostaye* et *Desains* ⁽¹⁾ étudièrent pour la première fois la polarisation par diffusion de rayons naturels tombant sur une surface mate. Pour le cas qui nous intéresse, ils observèrent les rayons diffusés dans le plan d'incidence, et cela dans toutes les directions comprises entre la surface et la normale, du côté du rayon incident ; l'angle d'incidence était fixe et valait 70°. Ils ne trouvèrent aucune polarisation pour le soufre, le cinabre, la céruse. Avec le platine platiné, ils trouvèrent qu'il y avait « très peu de polarisation dans la direction de la normale » et qu'en se rapprochant de la surface la polarisation « restait très faible ». D'après ces observations, on pourrait donc conclure que, dans le cas spécial qui nous intéresse et qui est celui du retour du rayon diffusé dans la direction du rayon incident, il n'y aurait certainement pas de polarisation pour les substances étudiées, excepté pour le platine platiné où il y aurait une polarisation très faible.

(1) *Ann. de Chim. et de Phys.*, 3^e série, t. XXIV, 1852, p. 215.

Gouy ⁽¹⁾ continua ces expériences, mais en étudiant seulement le cas d'un faisceau polarisé et en examinant les directions neutres où la lumière diffusée semblait naturelle. Il découvrit que la lumière est, en réalité, polarisée circulairement en ces points.

Lafay ⁽²⁾ reprit ce travail avec plus de détail, mais en se bornant toujours au cas d'un faisceau incident polarisé qu'il recevait sur du verre dépoli. Il étudia les vibrations elliptiques de la lumière diffusée dans les différentes directions et l'influence de la nature du verre.

Wright ⁽³⁾ réalisa des surfaces absolument mates en comprimant des poudres. Il cherchait à mesurer la quantité de lumière diffusée dans différentes directions, et cela pour trancher l'incertitude entre les formules de Lambert et celles de Lourmel Seeliger. Au cours de ces recherches, il montra que, dans ce cas, la lumière diffusée ne présentait dans aucune direction de traces de polarisation et qu'un faisceau incident polarisé était même complètement dépolarisé. Wright mit ce fait à profit pour étudier la quantité de lumière diffusée avec un photomètre à polarisation. De ces recherches on peut donc conclure que la polarisation par diffusion n'existe pas avec les surfaces dont il se servait.

Enfin *Umow* ⁽⁴⁾ étudia aussi la dépolarisation par diffusion d'un faisceau incident polarisé et la variation de cette dépolarisation avec la couleur.

D'après ces recherches, il résulte que la diffusion ne polarise pas, mais, au contraire, dépolarise même un rayon incident polarisé. Il n'y aurait donc de polarisation par diffusion que lorsqu'un phénomène de réflexion s'ajoute à celui de la diffusion. C'est là la théorie de *Verdet* ⁽⁵⁾, d'après laquelle la diffusion doit être considérée comme une réflexion à la surface des granules convexes de la surface. Dans le cas qui nous occupe, il ne pourrait donc y avoir polarisation, puisque les rayons réfléchis par les granules reviennent dans la direction des rayons incidents ; la polarisation par diffusion avec retour des rayons dans la direction d'incidence serait impossible théoriquement.

Pourtant, il faut remarquer que les rayons peuvent se réfléchir deux fois obliquement sur les granules de la surface pour revenir ensuite dans leur direction primitive ; il peut se faire aussi que les rayons soient déviés par réfraction avant de se réfléchir pour revenir dans la direction d'incidence. La théorie ne semble

(1) *Comptes rendus*, t. XCVIII, 1884, p. 978.

(2) *Comptes rendus*, t. CXIX, 1894, p. 154 ; *Ann. de Chim. et de Phys.*, 7^e série, t. XVI, 1899, p. 503.

(3) *Drudes Annalen*, t. I, 1900, p. 488.

(4) *Physikal. Zeitsch.*, t. VI, 1905, p. 674.

(5) *Optique physique*, t. II, p. 488.

donc pas s'opposer absolument à l'existence de la polarisation par diffusion dans ce cas spécial. D'autre part, aucune expérience, comme nous l'avons vu, n'a tranché cette incertitude. La seule expérience ayant donné un résultat, et due à De la Provostaye et Desains, est très vague et l'on ne sait pas s'ils ont observé dans la direction même du rayon incident. L'absence de polarisation des expériences de Wright montre simplement que certaines surfaces spéciales ne polarisent pas; mais ces surfaces sont très rares et la polarisation par diffusion existe pratiquement toujours, du moins dans les directions autres que celle où nous l'étudions.

L'expérience pouvait donc seule résoudre la question.

Nous avons donc fait l'expérience suivante :

Un faisceau de lumière solaire, ayant 6^{cm} à 10^{cm} de diamètre, tombe directement sur une surface diffusante dont on peut faire varier l'inclinaison par rapport aux rayons incidents. On examine cette surface à une distance de 2^m ou 3^m avec un polariscope de Savart et en plaçant l'œil tout contre la direction des rayons incidents. On opère dans une chambre noire pour ne pas avoir de polarisation par réflexion de lumière étrangère sur la surface.

Il sera intéressant, au point de vue de la Physique pure, de mesurer avec un photopolarimètre la proportion de lumière polarisée et de voir comment cette quantité varie avec l'inclinaison de la surface et avec la nature du corps diffusant. Nous ne croyons pas, en effet, que cette expérience ait jamais été faite.

Pour le cas astronomique qui nous intéresse ici, il nous suffit de remarquer que la polarisation existe, mais est très faible. Elle est absolument insensible avec des plaques de grès, mais est plus visible quand la surface est en partie réfléchissante, comme cela a lieu quand ce grès est fondu.

Il peut donc y avoir, croyons-nous, polarisation dans la diffusion avec retour des rayons, contrairement aux conclusions théoriques qu'on pourrait invoquer, mais cette polarisation est certainement très faible.

Nous ne croyons pas que cette polarisation puisse expliquer les observations d'Arago, etc. Nous croyons bien plutôt que ces observations sont erronées.

Nous en dirons autant des observations, ou plutôt de l'observation unique de polarisation de la planète Mars.

Le 4 juin 1894, *Pickering* ⁽¹⁾ observa, comme nous l'avons dit, que la région noire située près de la calotte polaire était polarisée; il en conclut que cette tache représentait une surface liquide réfléchissant la lumière de l'atmo-

(1) *Astronomy and Astrophysics*, t. XIII, 1894, p. 553.

sphère de Mars. Cette observation est extrêmement importante, car c'est une des bases sur lesquelles on s'est fondé pour démontrer que la surface de Mars contient très peu de mers.

Si cette observation est exacte, il pourrait se faire qu'elle ne prouve pas l'existence d'une mer. En effet, nous avons vu qu'il peut y avoir polarisation par diffusion, même quand le rayon revient sensiblement dans la direction du rayon incident. Il peut donc se faire que la tache noire en question soit simplement une surface analogue aux parties plus foncées de la Lune, qui polarisent fortement la lumière. En tout cas, il serait très important de vérifier ce fait à la prochaine opposition, en notant la grandeur de la phase et l'inclinaison de la surface au point considéré, pour voir si une surface diffusante, vue dans les mêmes conditions, ne polarise pas sensiblement la lumière.

Conclusions. — On voit, comme nous le disions au commencement, que l'étude de la polarisation en Astronomie, presque délaissée depuis Arago, est pourtant loin d'avoir porté tous ses fruits.

Nous avons pu mettre en évidence un certain nombre de faits nouveaux, théoriques et expérimentaux, dans l'étude de la polarisation de l'atmosphère, du Soleil, de la couronne, des planètes. Mais nous n'avons pas épuisé la question, et les éclipses prochaines, tant solaires que lunaires, fourniront l'occasion de travaux très importants qui, nous l'espérons, seront entrepris dans ce sens.

Vu et approuvé :

Paris, le 17 décembre 1910.

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

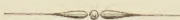
Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 17 décembre 1910.

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

TABLE DES MATIÈRES.



CHAPITRE I.

LA POLARISATION ATMOSPHÉRIQUE.

	Pages.
Historique.....	2
Travaux personnels.....	3

CHAPITRE II.

LE SOLEIL.

Historique.....	17
Travaux personnels.....	18

CHAPITRE III.

LA COURONNE SOLAIRE.

Historique.....	23
Travaux personnels.....	26

CHAPITRE IV.

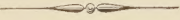
LES COMÈTES.

Historique.....	44
Travaux personnels.....	47

CHAPITRE V.

LA LUNE ET LES PLANÈTES.

Historique.....	48
Travaux personnels.....	50



SECONDE THÈSE.

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Spectres multiples des divers éléments.

Vu et approuvé :

Paris, le 17 décembre 1909,

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES,

PAUL APPELL.

Vu et permis d'imprimer :

Paris, le 17 décembre 1909,

LE VICE-RECTEUR DE L'ACADÉMIE DE PARIS,

L. LIARD.

44820 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS.
Quai des Grands-Augustins, 55.
